

## **Caracterização e melhoria de desempenho de secador de peças cerâmicas**

Projecto para a obtenção do grau de Mestre em Equipamentos e Sistemas  
Mecânicos  
Especialização em Projecto Instalação e Manutenção de Sistemas  
Térmicos

**Autor**  
**Vítor Alexandre Ferreira Rodrigues**

**Orientador**  
**Professor Doutor Gilberto Cordeiro Vaz**  
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

## **Agradecimentos**

Agradeço à Ana e ao Guilherme pela paciência, apoio, ajuda e motivação.

À empresa Roca, S.A. em especial à equipa de manutenção eléctrica e automação pela disponibilização de informação e equipamentos.

Ao Doutor Gilberto Vaz

*“The best way to predict the future is to create it”*

Peter Drucker

## RESUMO

O cenário económico e ambiental global da actualidade apresenta uma série de desafios às empresas com actividade baseada em processos industriais. Os custos energéticos destes processos ultrapassam frequentemente os 40% da factura operacional global das organizações, pelo que se torna cada vez mais relevante a análise de todas as operações unitárias constituintes de modo a que haja uma significativa redução de desperdícios na operação.

Actualmente, a liberalização de mercados, a dependência energética do país e a escassez de combustíveis fósseis estão a provocar uma escalada nos preços dos recursos energéticos. Embora já se verifique a proliferação da utilização de energias renováveis, verifica-se actualmente um abrandamento paralelo à diminuição de incentivos mercê do estado actual da economia.

Há no entanto, ganhos significativos potenciais numa forma alternativa de energia, a ausência de consumo. Esta forma de energia é já designada como a energia de futuro e assenta no princípio da eficiência energética.

Por outro lado, a incerteza de mercado e as flutuações na cadência produtiva, obrigam a que haja uma utilização muitas vezes longe do ponto óptimo dos equipamentos. A capacidade de resposta é inversamente proporcional à eficiência do processo, uma vez que nos dias que correm não há capacidade para criação de *stock*.

No processo de fabrico de produtos cerâmicos, no caso concreto, de produtos sanitários, a operação de secagem é um dos processos mais intensivos em consumo de energia térmica, sendo apenas suplantado pela cozedura. A conservação de energia é um passo essencial para a competitividade do processo produtivo, o facto é que, antes de haver capacidade para a optimização de um processo, é necessário um conhecimento do mesmo que permita identificar sobre que parâmetros actuar.

Este projecto surge com esse intuito. Pretende-se com este estudo, caracterizar os parâmetros operatórios de um secador descontínuo utilizado numa empresa de fabrico de artigos sanitários e identificar estratégias que permitam a sua operação no ponto de maior eficiência em todas as cadências produtivas que o mercado exija.

## Palavras chave

Cerâmica sanitária, Porcelana, Secagem, Humidade, Eficiência

## ABSTRACT

The current environmental and economic scenario post a series of challenges to industrial process based companies.

Energy costs often represent up to 40% of the global costs structure, for that reason the efficiency assessment of every unit operation is vital for and effective waste of operative resources reduction.

Nowadays, markets liberalization, energetic resources depletion and countries energetic dependence, are causing commodities prices rise.

However renewable energies are a well disseminated reality, the penetration process has been slowed down during the last three to four years due to the economic status. This opens an opportunity for the rise of another form of energy, the one we avoid to use. This is one of the future roads to be ridden, energy efficiency as a form of energy.

In the last twenty years, companies have invested in technological development and efficiency enhancement. The fact is that there were stability conditions and everything could be optimized to optimal levels. Nowadays, the uncertainty of markets causes production flow fluctuations, so severe that they push companies to a response time that must be faster than the capability to adapt to change. This is often a cause for inefficiency, a costly enemy of development. The truth is that industrial processes must be tweaked to survive change, or the competition will overtake, causing them to shut down.

In sanitary ware production process, the drying operation is one of the most intensive in energy consumption, mostly thermic.

Energy conservation is a must do step for factories survival. So, all functional parameters must be well known in order to maintain an optimal level operation.

That is the objective of this project. Characterizing the operative parameters of a chamber dryer of a sanitary ware ceramics production unit. Identifying strategies that will lead to the most efficient operation independently of the production level and market demands.

## KEYWORDS

Sanitaryware, Porcelain, Drying, Moisture, Efficiency

# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.2.	ENQUADRAMENTO	1
1.2.	ÂMBITO	2
1.3.	OBJECTIVOS	2
1.4.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
<b>2.</b>	<b>O PROCESSO PRODUTIVO DE CERÂMICA SANITÁRIA</b>	<b>5</b>
<b>2.1.</b>	<b>CERÂMICA</b>	<b>5</b>
2.1.1.	CERÂMICA VERMELHA	7
2.1.2.	CERÂMICA OU MATERIAIS DE REVESTIMENTO	8
2.1.3.	CERÂMICA BRANCA	8
2.1.4.	MATERIAIS REFRACTÁRIOS	8
2.1.5.	ISOLANTES TÉRMICOS	9
2.1.6.	FRITAS E CORANTES	9
2.1.7.	ABRASIVOS	10
2.1.8.	VIDRO, CIMENTO E CAL	10
2.1.9.	CERÂMICA DE ALTA TECNOLOGIA/ CERÂMICA AVANÇADA	10
<b>2.2.</b>	<b>CERÂMICA SANITÁRIA</b>	<b>12</b>
<b>2.3.</b>	<b>PROCESSO DE FABRICO</b>	<b>14</b>
2.3.1.	PREPARAÇÃO DE PASTA	15
2.3.2.	CONFORMAÇÃO	15
2.3.3.	ACABAMENTO	15
2.3.4.	SECAGEM	16
2.3.5.	VIDRAGEM	16
2.3.6.	COZEDURA	16
2.3.7.	ESCOLHA	18
2.3.8.	CUSTOS	18
<b>3.</b>	<b>SECAGEM</b>	<b>19</b>
<b>3.1.</b>	<b>INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE SECAGEM</b>	<b>19</b>
<b>3.2.</b>	<b>CONCEITOS TEÓRICOS</b>	<b>20</b>
3.2.1.	HUMIDADE NOS SÓLIDOS	20
3.2.2.	PROCESSOS DE SECAGEM	22
3.2.3.	MECANISMOS DE SECAGEM	24
3.2.4.	ETAPAS DE SECAGEM	24
3.2.5.	PROPRIEDADES DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA CARACTERÍSTICAS	28
<b>4.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO SECADOR</b>	<b>31</b>
<b>4.1.</b>	<b>INSTALAÇÃO</b>	<b>31</b>
<b>4.2.</b>	<b>CURVA DE SECAGEM</b>	<b>40</b>
<b>5.</b>	<b>COMPONENTE EXPERIMENTAL</b>	<b>42</b>
<b>5.1.</b>	<b>EQUIPAMENTO UTILIZADO</b>	<b>42</b>
<b>5.2.</b>	<b>ENSAIOS REALIZADOS E RESULTADOS</b>	<b>43</b>
<b>5.3.</b>	<b>CONSUMOS DE ENERGIA TÉRMICA DO SECADOR</b>	<b>49</b>
<b>5.4.</b>	<b>PROPOSTA DE INTERVENÇÃO</b>	<b>51</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>52</b>
<b>6.1.</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS</b>	<b>52</b>
<b>6.2.</b>	<b>TRABALHO FUTURO</b>	<b>53</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>55</b>

## ÍNDICE DE OBJECTOS

FIGURA 1: EXEMPLO DE PEÇAS DE CERÂMICA SANITÁRIA.	12
FIGURA 2: CONSTITUIÇÃO DE UM CORPO DE CERÂMICA SANITÁRIA.	13
FIGURA 3: PROCESSO DE FABRICO DE CERÂMICA SANITÁRIA.	14
FIGURA 4: ESTRUTURA DE CUSTOS PRODUÇÃO DE CERÂMICA SANITÁRIA	18
FIGURA 5: CURVAS DE ABSORÇÃO-DESORÇÃO ISOTÉRMICA TÍPICA.	21
FIGURA 6: ESQUEMA DOS FENÓMENOS DE TRANSPORTE EM SECAGEM CONVECTIVA.	23
FIGURA 7: HUMIDADE E TEMPERATURA PARA CONDIÇÕES DE SECAGEM CONSTANTES.	25
FIGURA 8: SECADOR CONTÍNUO DE PEÇAS CERÂMICAS.	31
FIGURA 9: SECADOR DESCONTÍNUO.	32
FIGURA 10: VISTA DO INTERIOR DO SECADOR.	32
FIGURA 11: PORMENOR DA PAREDE DUPLA DO SECADOR.	32
FIGURA 12: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO LAYOUT DA INSTALAÇÃO EM ESTUDO.	33
FIGURA 13: VISTA DA CÁPSULA DE QUEIMA.	33
FIGURA 14: VISTA DA CÁPSULA DE QUEIMA E DO VENTILADOR DE IMPULSÃO.	34
FIGURA 15: DIFUSOR LATERAL DO SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO.	34
FIGURA 16: CONE DE DIFUSÃO.	35
FIGURA 17: VISTA INTERIOR DO SECADOR COM CARROS DE PEÇAS.	35
FIGURA 18: ADMISSÃO DE AR DO EXTERIOR.	36
FIGURA 19: ADMISSÃO DE AR POR CIMA DO FORNO.	36
FIGURA 20: TÔMBOLA MISTURADORA.	36
FIGURA 21: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA TÔMBOLA DE MISTURA.	37
FIGURA 23: SISTEMA DE RECIRCULAÇÃO.	38
FIGURA 24: TUBOS DE EXTRACÇÃO E MOTORES DE ROTAÇÃO DOS CONES DIFUSORES.	38
FIGURA 25: TUBOS E CONDUTAS DE EXTRACÇÃO E INSUFLAÇÃO.	39
FIGURA 26: VISTA DO INTERIOR DA CÂMARA DE SECAGEM.	40
FIGURA 27: CURVA DE SECAGEM UTILIZADA NO SECADOR.	41
FIGURA 28: SISTEMA DE SUPERVISÃO E CONTROLO DO SECADOR.	42
GRÁFICO 1: CICLO DE SECAGEM QUARTA PARA QUINTA FEIRA 1ªSEMANA.	43
GRÁFICO 2: CICLO DE SECAGEM DE QUINTA PARA SEXTA FEIRA 1ªSEMANA.	44
GRÁFICO 3: CICLO DE SECAGEM DE SEXTA FEIRA A DOMINGO 1ªSEMANA.	44
GRÁFICO 4: CICLO DE SECAGEM SEGUNDA PARA TERÇA FEIRA 1ªSEMANA.	45
GRÁFICO 5: CICLO DE SECAGEM DE TERÇA PARA QUARTA FEIRA 1ªSEMANA.	45
GRÁFICO 6: CICLO DE SECAGEM DE QUARTA PARA QUINTA FEIRA 2ªSEMANA.	46
GRÁFICO 7: CICLO DE SECAGEM DE QUINTA PARA SEXTA FEIRA 2ªSEMANA.	46
GRÁFICO 8: CICLO DE SECAGEM DE SEXTA FEIRA A DOMINGO 2ªSEMANA.	47
GRÁFICO 9: CICLO DE SECAGEM DE SEGUNDA PARA TERÇA FEIRA 2ªSEMANA.	47
GRÁFICO 10: CONSUMO DE GÁS DE UM CICLO DE SECAGEM.	48
GRÁFICO 11: EVOLUÇÃO DO PESO DE UMA PEÇA DURANTE O CICLO DE SECAGEM.	48
TABELA 1: CONSUMO ESPECÍFICO DA INDÚSTRIA CERÂMICA NA EUROPA (GJ/T)	18
TABELA 2: CARGAS E CONSUMOS DE GÁS DURANTE O MÊS DE MARÇO 2013.	49
TABELA 3: CARGAS E CONSUMOS DE GÁS DURANTE O MÊS DE MARÇO 2013.	50





## NOMENCLATURA

$X$	humidade em base seca	$kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido seco}}$
$m_w$	massa de água	$kg$
$m_{ds}$	massa de sólido seco	$kg$
$W$	humidade em base húmida	$kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido húmido}}$
$X_e$	humidade de equilíbrio	$kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido seco}}$
$X_i$	humidade inicial	$kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido seco}}$
$X_{cr}$	humidade crítica	$kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido seco}}$
$T_i$	temperatura inicial	$^{\circ}C$
$T_{\infty}$	temperatura ambiente	$^{\circ}C$
$T_{wb}$	temperatura de bolbo húmido	$^{\circ}C$
$h_m$	coeficiente de transferência de massa por convecção	$kg/m^2.s$
$N_i$	velocidade de secagem	$kg_{\text{água}}/s$
$f$	velocidade de secagem característica	$kg_{\text{água}}/s$
$N$	velocidade de secagem por unidade de área	$kg_{\text{água}}/s.m^2$
$D_{eff}$	difusividade efectiva	$m^2/s$
$h_c$	coeficiente de transferência de calor por convecção	$W/m^2.k$
$A_s$	área de superfície do sólido	$m^2$
$Y$	humidade do ar	$kg_{\text{água}}/kg_{\text{ar húmido}}$
$Y_i$	humidade do ar na interface ar/sólido	$kg_{\text{água}}/kg_{\text{ar húmido}}$
$Bi$	número de Biot	-
$K$	constante de secagem	$min^{-1}$
$\delta$	espessura da placa a secar	$m$

# 1.INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

O panorama energético global e os desafios económicos que atravessamos, levaram a que, nas últimas décadas tenham sido tomadas medidas significativas para um aumento da eficiência energética dos mais variados sectores de actividade. O aumento dos preços dos combustíveis, da energia eléctrica e o consequente aumento do preço das matérias-primas levou a que o sector industrial se visse forçado a melhorar o seu desempenho energético. A entrada nos mercados globais de países com recursos humanos e de contexto disponíveis e abundantes a baixo custo, aumentou os níveis de concorrência e elevou a fasquia em indústrias consumidoras intensivas de recursos. A única maneira das empresas ocidentais serem competitivas é por via da qualidade dos seus produtos e da eficiência dos seus processos.

A indústria de artigos cerâmicos sanitários, devido ao seu processo ,ainda, muito manual, não tem conseguido acompanhar o aumento de eficiência conseguido nas indústrias de cerâmica estrutural e de pavimentos/revestimentos das últimas décadas.

Desta forma, é um desafio aliciante, o de estudar estratégias que permitam melhorar o desempenho global desse processo produtivo que é consumidor intensivo em energia eléctrica pela utilização generalizada de ar comprimido, ventilação e iluminação, e consumidor intensivo de energia térmica proveniente da queima de gás natural para climatização, secagem e cozedura.

Dentro deste processo, a secagem é uma das etapas chave, antes dos fornos é a etapa que apresenta maior consumo de energia térmica. Esta secagem é realizada logo a partir do momento em que as peças são retiradas dos moldes, mas a etapa definitiva é realizada em secadores de câmara de funcionamento descontínuo, apresentando um potencial de optimização ao nível do aproveitamento de calor residual de outros processos para aquecimento do ar de secagem bem como ao nível da optimização dos parâmetros operatórios do próprio processo de secagem.

## **1.2. Âmbito**

O desenvolvimento deste projecto surge no âmbito da conjugação da minha actividade profissional numa empresa de cerâmica sanitária localizada no concelho de Leiria com a realização do mestrado em equipamentos e sistemas mecânicos no ISEC. Neste cenário, como responsável funcional pelos equipamentos de secagem, surge o interesse em obter o melhor desempenho energético antes da cozedura com o objectivo de melhorar a eficiência global do processo produtivo.

## **1.3. Objectivos**

Pretende-se com este trabalho, identificar os parâmetros a controlar que permitam obter curvas de secagem ajustadas a diversos ritmos produtivos. As oscilações provocadas pelas solicitações do mercado podem reduzir a eficiência do processo de secagem conduzindo a um aumento de custos e perda de competitividade. No panorama económico actual, isso pode colocar em causa a continuidade de uma unidade produtiva.

A instalação industrial, dispõe de vários secadores, mas este projecto incidirá sobre um deles, representando 10% do consumo total de gás natural da unidade.

O secador descontínuo é uma câmara onde são introduzidas peças antes do processo de vidragem e cozedura. Esta câmara é carregada diariamente e descarregada no dia seguinte após um ciclo de secagem de 14 horas. É retirada a humidade remanescente do processo de conformação permitindo desta forma o transporte, acabamento e cozedura do produto.

Está definido pelos parâmetros tecnológicos do processo um teor de humidade inferior a 1% (em peso) nas peças à saída do secador. Pretende-se desta forma, caracterizar o funcionamento do secador e identificar estratégias que permitam reduzir o consumo específico do equipamento. Pretende-se subsequentemente adoptar as medidas que tiverem viabilidade a todos os equipamentos similares existentes na instalação.

## **1.4. Organização do trabalho**

Pretende-se estudar a secagem de peças cerâmicas efectuada numa unidade industrial de produção de componentes sanitários em porcelana. Como introdução ao estudo, é fundamental situar a operação de secagem no processo industrial, fazendo no capítulo 2, uma descrição do fluxo produtivo. É importante salientar que o processo de secagem ocorre logo a partir do momento de conformação do produto. Esta introdução é fundamental para que o processo seja compreendido de uma forma global ao longo deste trabalho.

No terceiro capítulo são revistos os conceitos teóricos que constituem a base de compreensão da operação unitária de secagem, fazendo-se uma breve descrição dos equipamentos mais comuns nesta indústria. É feita ainda uma descrição detalhada da câmara de secagem em estudo.

Após esta revisão, no quarto capítulo, é descrito o secador alvo deste projecto.

O quinto capítulo constitui a parte prática deste projecto. É estudado o consumo de gás natural em função da carga do secador num período de um mês, procurando determinar um indicador de eficiência do processo. Realiza-se também a análise comparativa de vários ciclos de secagem comparando a perda de massa de um carro de controlo em cada ciclo.

No capítulo seis são discutidas as conclusões gerais do trabalho e apresentadas oportunidades futuras de trabalho a desenvolver como complemento a este estudo.



## 2. O processo produtivo de cerâmica sanitária

### 2.1. Cerâmica

O termo cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas.

Os materiais cerâmicos são fabricados a partir de matérias-primas classificadas como naturais e sintéticas. As naturais mais utilizadas industrialmente são: argila, caulino, quartzo, feldspato, talco, calcite, dolomite, e zircónio. As sintéticas incluem, entre outras, aluminas (óxido de alumínio) sob diferentes formas (calcinada, eletrofundida e tabular); carbetos de silício ( $SiC$ ) e diversos produtos químicos inorgânicos.

Dependendo do produto a ser obtido e das propriedades desejadas, a ,ou as, matérias-primas são seleccionadas e submetidas a uma série de operações, sendo que, pelo menos em uma delas, ocorre tratamento térmico em temperaturas elevadas. Nesta operação podem ocorrer uma séries de alterações nas características das matérias-primas, principalmente nas naturais, como: perda de massa, composição química, estrutura cristalina, surgimento de novas fases cristalinas e formação de fase vítrea. Portanto, em função do tratamento térmico e das características das diferentes matérias-primas são obtidos produtos para as mais diversas aplicações.

As principais etapas do processamento dos materiais cerâmicos incluem de uma forma geral a preparação das matérias-primas e da massa, a conformação, o processamento térmico (secagem e cozedura) e o acabamento.

Cerâmica é a denominação comum a todos os artigos ou objectos produzidos com argila e queimados/cozidos ao fogo. A transformação do barro em cerâmica acontece durante a queima. Quando a argila é queimada e se torna firme, na sua primeira queima obtêm-se o chamado biscoito, que apesar de não mais voltar ao estado plástico ainda possui características frágeis, pois se cair no chão ou for alvo de um impacto forte, parte-se em muitos pedaços. A argila existe em toda a superfície terrestre. Alguns tipos são encontrados a céu aberto e outros em minas subterrâneas ou jazidas. A argila quando retirada da natureza geralmente contém corpos indesejáveis, impurezas orgânicas, e por isso necessita ser beneficiada através de processos mecânicos e químicos. Para cada categoria da produção cerâmica a produção das massas argilosas necessita do acréscimo ou da retirada de elementos da sua composição, de acordo com a sua aplicação, evitando assim a ocorrência de fissuras. Dos muitos tipos de argila existentes são produzidas as massas cerâmicas que são utilizadas

na fabricação de utensílios cerâmicos como telhas, tijolos, manilhas, abobadilhas, etc. que constituem a denominada cerâmica estrutural. As massas de adobe são empregadas cruas na construção de moradias. Tem-se a chamada louça branca usada em peças sanitárias, azulejos, pisos de alto impacto, refractários, isoladores eléctricos, condutores eléctricos, etc. E as massas cerâmicas para a chamada cerâmica artística.

Os materiais cerâmicos têm propriedades eléctricas como isolantes de alta-voltagem, em resistências, como a memória em computadores, velas na combustão interna de motores e, mais recentemente, em aplicações de supercondutores de alta temperatura. Cerâmicas são essenciais para a indústria de construção, para a indústria petroquímica, para gerar electricidade, para as comunicações, exploração espacial, medicina, sanitários. Filtros de cerâmica feitos de porcelana porosa podem isolar micróbios e bactérias do leite e água potável, separar poeira de gases e remover partículas sólidas de líquidos.

Escudos de cerâmica, leves e resistentes ao impacto, têm sido utilizados para proteger aviões, veículos militares e soldados. A cerâmica mono-cristalina tem importantes aplicações mecânicas, eléctricas e ópticas. Cerâmicas incluem itens tão delicados que podem ser quebrados por um leve toque, tão resistentes que podem proteger nosso próprio corpo e tão duradouros que permanecem depois de milhares de anos revelando-nos a história dos nossos mais remotos ancestrais.

A cerâmica surgiu durante o Neolítico, fase do desenvolvimento técnico das sociedades humanas, correspondente ao seu acesso a uma economia produtiva. Este período, caracterizado pelo desenvolvimento de novas técnicas tem como factor de primordial importância o estabelecimento de novas relações entre o homem e o meio natural, decorrentes da descoberta de meios de controlar e desenvolver os recursos para a sua sedentarização.

Considerou-se durante muito tempo que a cerâmica era uma característica deste período. No entanto o reconhecimento de um neolítico pré-cerâmico no próximo Oriente (Jericó) e as descobertas de vasos cerâmicos em grupos nómadas datados de cerca de 6000 AC. no Japão, obriga-nos a considerar a existência de duas fases: a pré-cerâmica entre o fim do VIII milénio AC. e o princípio do VI e a cerâmica a seguir a esta data e que se prolongou até à idade do Bronze.

No Sudoeste da Ásia (Irão, Palestina e Sul da Turquia) surgiam espontaneamente o trigo e a cevada, bem como existia no estado selvagem o gado bovino e caprino que permitiram a revolução (passagem a uma economia de produção) atrás referenciada.

Não é pois de estranhar que o desenvolvimento inicial da cerâmica se tenha dado no Próximo Oriente, visto ter sido aí que se verificou a necessidade de armazenar os alimentos recolhidos da agricultura; de casas para abrigar uma população crescente; de símbolos que satisfizessem

as necessidades espirituais e fornos que transformassem a farinha do trigo em pão que levou à construção de vasos, tijolos, estatuetas e elementos decorativos em argila.

Quanto a Portugal há que referir alguns aspectos: houve um primeiro período em que se manifestaram as influências Europeia e Mediterrânica para o aparecimento e desenvolvimento desta arte, através dos "invasores" no primeiro caso e dos mercadores no segundo.

O aparecimento de um tipo específico de cerâmica proveniente de uma cultura situada no Vale do Tejo e que posteriormente se espalhou por toda a Europa: a cerâmica campaniforme.

A existência de uma cerâmica típica (cerâmica ibérica), já no tempo da chegada dos Romanos e a influência destes e mais tarde dos Árabes foram fundamentais para o desenvolvimento do processo de olaria.

O grande desenvolvimento verificado nos séculos XVII e XVIII, especialmente neste último, devido à existência de ceramistas de vulto como Briosio e Vandelli e à fundação de Fábrica do Rato, esteve na base do aparecimento de outras fábricas importantes por todo o território.

O aparecimento no século XIX da porcelana (Vista Alegre) e da faiança fina (Sacavém) em parte como reacção à invasão do nosso mercado por produtos ingleses, melhores e mais baratos, porque fabricados pelos novos processos saídos da Revolução Industrial.

O aumento do número de fábricas verificado nos fins do século XIX e primeiras décadas do século XX e o seu decréscimo nas décadas seguintes, como consequência da concentração industrial que era apanágio da "grande indústria" nascente, processo a que a cerâmica não ficou alheia.

O sector cerâmico é amplo e heterogéneo o que justifica a sua divisão em sub-sectores ou segmentos em função de diversos factores, como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. Dessa forma, em geral, é adoptada a seguinte classificação:

### **2.1.1. Cerâmica vermelha**

Compreende aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telha e tubos cerâmicos / manilhas) e também argila expandida (agregado leve), utensílios domésticos e adorno. As lajotas muitas vezes são enquadradas neste grupo e outras, em Cerâmicas ou Materiais de Revestimento.



### **2.1.2. Cerâmica ou materiais de revestimento**

Compreende aqueles materiais usados na construção civil para revestimento de paredes, piso e bancadas tais como azulejos, placas ou ladrilhos para piso e pastilhas.

São aqueles materiais, na forma de placas usados na construção civil para revestimento de paredes, pisos, bancadas e piscinas de ambientes internos e externos. Recebem designações tais como: azulejo, pastilha, porcelanato, grés, lajota, pavimento, etc.

### **2.1.3. Cerâmica branca**

Este grupo é bastante diversificado, compreendendo materiais constituídos por um corpo branco e em geral recobertos por uma camada vítrea transparente e que eram assim agrupados pela cor branca de massa, necessária por razões estéticas e/ou técnicas. Com o advento dos vidrados opacos, muitos dos produtos enquadrados nesse grupo passaram a ser fabricados, sem prejuízo das características para uma das aplicações, com matérias-primas com certo grau de impurezas, responsáveis pela coloração. Muitas vezes prefere-se subdividir este grupo em função da utilização dos produtos em:

- Louça sanitária;
- Louça de mesa;
- Isoladores eléctricos para linhas de transmissão e de distribuição;
- Utensílios domésticos e adorno;
- Cerâmica técnica para fins diversos, tais como: químico, eléctrico, térmico e mecânico.

### **2.1.4. Materiais refractários**

Este grupo compreende uma gama grande de produtos, que têm como finalidade suportar temperaturas elevadas nas condições específicas de processo e de operação dos equipamentos industriais, que envolveram esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outras solicitações.

Os metais e as suas ligas são utilizados para o fabrico de automóveis, maquinaria, aviões, edifícios e uma quantidade indeterminada de possíveis coisas úteis. Mas a produção de metal não seria possível sem o uso de um material cerâmico chamado refractário. Os refractários tornam possível a construção de altos fornos siderúrgicos e centrais térmicas que são o coração da indústria moderna.

Os refractários podem resistir a condições voláteis e de altas temperaturas encontradas no processamento dos metais. As cerâmicas refractárias são igualmente materiais benéficos para outras indústrias. As químicas, petrolíferas, conversão energética, vidro e outras indústrias cerâmicas dependem de materiais refractários. Para suportar estas solicitações e em função da natureza das mesmas, foram desenvolvidos inúmeros tipos de produtos, a partir de diferentes matérias-primas ou mistura destas. Dessa forma podemos classificar os produtos refractários, quanto a matéria-prima ou componente químico principal em: sílica, sílica-alumina, alumina, mulite, cromite-magnesite, carbonato de silício, grafite, carbono, zircónio, zirconite, esplénico e outros.

Este grupo compreende uma gama grande de produtos, que têm como finalidade suportar temperaturas elevadas nas condições específicas de processo e de operação dos equipamentos industriais, que em geral envolvendo esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outras solicitações.

#### **2.1.5. Isolantes térmicos**

Os produtos deste segmento podem ser classificados em:

- a) Refractários isolantes que se enquadram no segmento de refractários;
- b) Isolantes térmicos não refractários, compreendendo produtos, tais como vermiculite expandida, sílica diatomácea, diatomito, silicato de cálcio, lã de vidro, lã de escória e lã cerâmica, que são obtidos por processos distintos ao do item a) e que podem ser utilizados, dependendo do tipo de produto até 1100°C;
- c) Fibras ou lãs cerâmicas que apresentam características físicas semelhantes às citadas em b), porém apresentam composições tais como sílica, sílica-alumina, alumina e zircônia, que dependendo do tipo, podem chegar a temperaturas de utilização de 2000°C ou mais.

#### **2.1.6. Fritas e corantes**

Estes dois tipos de produtos são importantes matérias-primas para diversos segmentos cerâmicos cujos produtos requerem determinados acabamentos.

Frita (ou vidrado fritado) é um vidro moído, fabricado por indústrias especializadas a partir da fusão da mistura de diferentes matérias-primas. Este pó é aplicado na superfície do corpo

cerâmico, que após a queima, adquire aspecto vítreo. Este acabamento tem por finalidade aprimorar a estética, tornar a peça impermeável, aumentar a resistência mecânica e melhorar ou proporcionar outras características.

Corantes constituem-se de óxidos puros ou pigmentos inorgânicos sintéticos obtidos a partir da mistura de óxidos ou de seus compostos. Os pigmentos são fabricados por empresas especializadas, inclusive por muitas das que produzem fritas, cuja obtenção envolve a mistura das matérias-primas, calcinação e moagem.

Os corantes são adicionados aos vidrados (cru, frita ou híbrido) ou aos corpos cerâmicos para conferir-lhes colorações das mais diversas tonalidades e efeitos especiais.

### **2.1.7. Abrasivos**

Parte da indústria de abrasivos, por utilizarem matérias-primas e processos semelhantes ao da cerâmica, constituem-se num segmento cerâmico. Entre os produtos mais conhecidos podemos citar o óxido de alumínio eletrofundido e o carbetto de silício.

### **2.1.8. Vidro, cimento e cal**

São três importantes segmentos cerâmicos e que, por suas particularidades, são muitas vezes considerados à parte da cerâmica.

### **2.1.9. Cerâmica de alta tecnologia/cerâmica avançada**

O aprofundamento dos conhecimentos da ciência dos materiais proporcionou ao homem o desenvolvimento de novas tecnologias e aprimoramento das existentes nas mais diferentes áreas, como aeroespacial, electrónica, nuclear e muitas outras e que passaram a surgir materiais com qualidade excepcionalmente elevada. Tais materiais passaram a ser desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por meio de processos rigorosamente controlados. Estes produtos, que podem apresentar os mais diferentes formatos, são fabricados pelo chamado segmento cerâmico de alta tecnologia ou cerâmica avançada. Eles são classificados de acordo com as suas funções em: electrónicas, magnética, ópticas, químicas, térmicas, mecânicas, biológicas e nucleares. Os produtos deste segmento, são de uso intenso e a cada dia tende a ampliar-se. Como alguns exemplos, podemos citar: naves espaciais, satélites, centrais nucleares, implantes em seres humanos, aparelhos de som e de vídeo, suporte de catalisadores para automóveis, sensores (humidade, gases e outros), ferramentas de corte, brinquedos, acendedores de fogão, etc

A indústria da construção engloba áreas como os edifícios comerciais, residenciais, auto-estradas, pontes, e sistemas de água e esgoto. Estas áreas, as que normalmente tomamos como garantidas, não seriam possíveis sem os materiais cerâmicos. Produtos como a telha de

parede e telhado, cimento, tijolo, cano de esgoto e vidro são os pilares de um edifício no mundo da construção. O tijolo é usado para construir casas de habitação e edifícios devido à força, durabilidade e beleza. É o único produto de construção que não arde, derrete, amolga, descasca, apodrece, enferruja ou é comido pelas térmitas. Podem ser fabricados em aproximadamente 10.000 diferentes cores, texturas, tamanhos e formas. A telha cerâmica é usada em aplicações tais como pavimentação, paredes, lareiras, etc. É também um material com grande durabilidade e um produto de grande higiene na construção que adiciona beleza em qualquer aplicação.

A vasta indústria electrónica não existiria se não houvesse cerâmica. A cerâmica tem um vasto leque de propriedades electrónicas tais como isolamento, semicondutores, super condutores, piezoelectrónica e magnéticas. Há produtos para os quais a cerâmica é crítica. Componentes electrónicos individuais e circuitos integrados complexos com multi componentes têm sido fabricados com materiais cerâmicos.

Cerâmicos semicondutores tornaram possíveis os rádios transistorizados e a televisão portátil que revolucionaram o modo de pensar sobre educação e diversão.

Cerâmicas estão-se a tornar incrivelmente úteis para o mundo médico. Cirurgiões estão a usar materiais bio-cerâmicos para reparar e substituir ossos das ancas, joelhos e outras partes do corpo humano. Elas estão também a ser usadas para substituir válvulas cardíacas em deficiente estado. Quando usadas no corpo humano como implantes ou mesmo como revestimento para materiais metálicos, podem estimular o crescimento dos ossos, promover a formação de tecidos e fornecer protecção do sistema imunitário. Elas são usadas até mesmo por dentistas em próteses, coroas, cimento e implantes dentários. Os materiais cerâmicos são dos poucos materiais que têm durabilidade e estabilidade suficientes para suportar os efeitos corrosivos dos fluidos corporais. Os modernos materiais cerâmicos têm um importante papel nos sistemas de tomografia axial computadorizada (TAC) de raios X e ultra-sónicos, essenciais para diagnósticos médicos.

As cerâmicas têm um importante papel nas solicitações das necessidades ambientais. Podem ajudar na diminuição da poluição, capturar materiais tóxicos e encapsular resíduos nucleares.

Hoje, conversores catalíticos dos automóveis e caminhões são feitos de cerâmicas celulares e ajudam a converter gases nocivos como o monóxido de carbono em água e hidróxido de carbono. Cerâmicas avançadas estão a começar a ser usadas em motores diesel. As propriedades de leveza, resistência a altas temperaturas e ao desgaste conferem resultados de maior eficiência na combustão e significativas poupanças de combustíveis.

A resistência ao calor e peso leve são algumas das características mais atractivas nos materiais cerâmicos. Por essas razões as telhas de cerâmica fornecem blindagem ao aquecimento na naves espaciais de hoje, nomeadamente nos usados pelo programa espacial da NASA.

## 2.2. Cerâmica sanitária



**Figura 1: Exemplo de peças de cerâmica sanitária.**

A cerâmica sanitária (Figura 1) é definida como uma porcelana vidrada de aspecto translúcido contendo argila, caulino e sílica. Esta porcelana tem usualmente um aspecto branco ou “casca de ovo”.

O conjunto de artigos cerâmicos que se pode encontrar numa casa de banho é designado por cerâmica sanitária.

Esta porcelana, como se pode ver na Figura 2, é constituída por duas camadas:

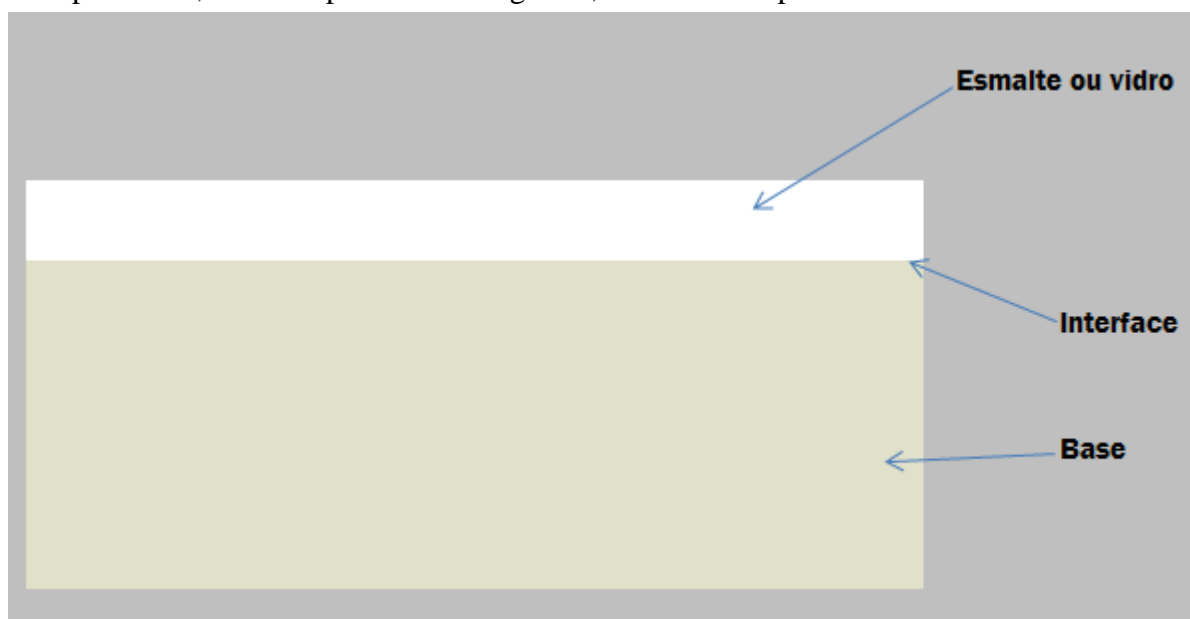


Figura 2: Constituição de um corpo de cerâmica sanitária.

**Base:** Uma mistura de argilas, caulino e sílica e aditivos, constitui o aspecto estrutural de qualquer peça de cerâmica sanitária. Esta camada tem tipicamente uma espessura que pode variar entre 7 e 30mm. Sendo uma base de porcelana, a absorção de água deste corpo é sempre inferior a 1%.

**Vidro:** Uma camada vítrea com uma espessura entre 0,5 e 1,3mm confere o aspecto conhecido nas peças de porcelana, normalmente apresenta uma cor branca translúcida, mas pode adquirir diferentes colorações em função de pigmentações realizadas, pode apresentar também um aspecto brilhante ou mate. Além do embelezamento da peça, a camada de esmalte reforça o carácter impermeável das peças e melhora a funcionalidade dos artigos no que respeita a lavagem e higienização.

### 2.3. Processo de fabrico

O processo de fabrico de artigos cerâmicos (Figura 3), independentemente da sua classificação é constituído pelas operações de preparação de matérias primas, conformação, secagem e cozedura. O processo em que está localizada a operação de secagem objecto deste estudo, tem a seguinte configuração:

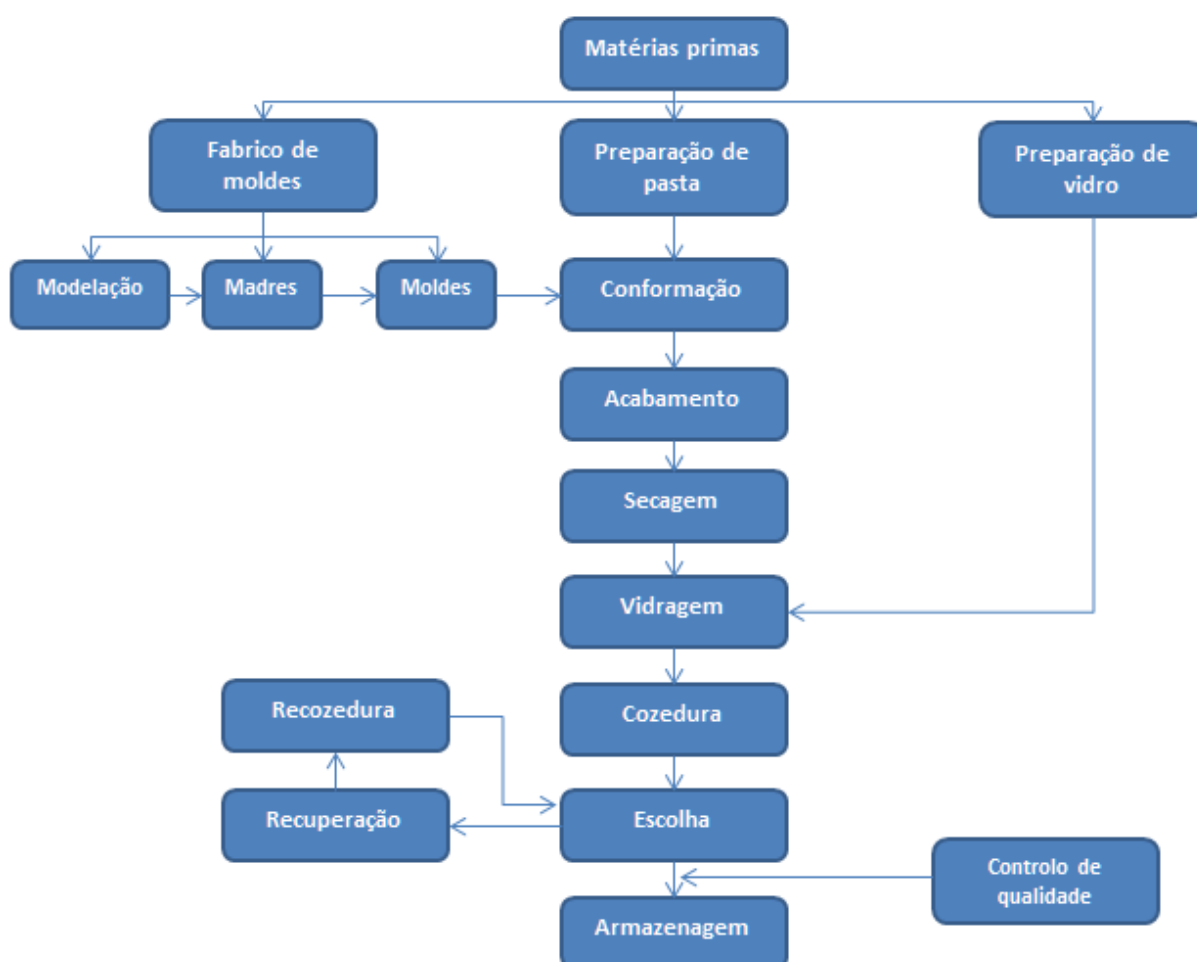


Figura 3: Processo de fabrico de cerâmica sanitária.

### **2.3.1 Preparação de pasta**

Nesta etapa inicial do processo, é feita a mistura e preparação de matérias primas através de processos de dosagem, moagem e diluição com vista à obtenção de uma suspensão de sólidos em meio aquoso denominada de barbotina, ou pasta cerâmica. Esta suspensão tem tipicamente um teor de sólidos de 55% sendo os restantes 45% constituídos por água. Este rácio permite o transporte por bombagem e a conformação por enchimento de moldes.

### **2.3.2. Conformação**

A forma complexa das peças de cerâmica sanitária inviabiliza processos de conformação a seco ou semi seco como a prensagem ou a extrusão. A conformação destas peças é realizada através de um processo de enchimento de moldes de gesso ou de resina porosa. A acção de absorção de água destes moldes origina que haja uma formação de parede sólida em torno dos mesmos. Após tempos definidos tecnologicamente, é feito o vazamento do excedente de barbotina e procede-se à desmolda das peças, através de processos manuais ou semi automáticos. Neste período a matriz cerâmica das peças contém um teor de água de cerca de 30%, que lhes confere uma plasticidade que permite as operações de acabamento e simultaneamente uma resistência mecânica que possibilita a quase autosustentação das peças. Pelo que parte desta sustentação é realizada por aparadeiras de poliuretano.

### **2.3.3. Acabamento**

Após a desmoldagem das peças são efectuadas operações de corte e eliminação de rebarbas criadas durante a operação de conformação. Estas operações são essenciais para a abertura de canais funcionais essenciais ao funcionamento dos produtos. As salas onde estas operações são realizadas estão climatizadas a uma temperatura e humidade relativa do ar tais que a secagem inicial das peças se suceda a uma taxa controlada. Ao mesmo tempo, há o objectivo de recuperação (secagem) dos moldes de gesso localizados no mesmo espaço. Este processo de perda de humidade inicia-se na conformação e continua após a desmolda das peças. À saída das salas de conformação e acabamento a humidade das peças situa-se num valor médio de 16 a 18%.



### **2.3.4. Secagem**

Esta etapa do processo destina-se à extracção da água contida na matriz cerâmica das peças, embora este processo esteja iniciado, é condição para avanço no processo que a humidade das peças seja reduzida para um máximo de 1%. Essa remoção de humidade é realizada em secadores, nesta indústria é frequente a utilização de secadores contínuos e secadores de micro ondas em instalações modernas. No caso deste estudo, trata-se de um secador descontínuo de câmara estacionária. O mesmo é carregado diariamente, sendo feito 1 ciclo de secagem por dia.

O desafio da operação de secagem é o facto de ter de ser feita com a melhor eficiência possível, mas mantendo inalterada a qualidade do produto seco. Ao longo do processo a peça diminui de tamanho, havendo um processo de contracção por perda de humidade. Este processo é crítico na medida em que a alteração física do tamanho da peça pode provocar defeitos como fissuras e rachas se diferentes partes das peças tiverem secagens a diferentes ritmos.

### **2.3.5. Vidragem**

Após a secagem, as peças estão prontas para o processo de vidragem que é realizado em instalações denominadas de carroceis, onde uma equipa de operários prepara as peças para receber a camada de vidro, sendo realizado um controlo de qualidade para verificar a existência de defeitos nas peças cruas. Após a aprovação das peças, as mesmas recebem uma camada de vidro por pulverização, num processo similar ao de pintura automóvel.

Após a operação de vidragem, as peças estão preparadas para a etapa final do processo de transformação cerâmica, a cozedura ou queima.

### **2.3.6. Cozedura**

Até à etapa de cozedura, as peças cerâmicas encontram-se num estado frágil, sendo muito fácil a sua destruição através de pequenos impactos. No processo de cozedura são realizadas as transformações físicas e químicas que conferem às peças cerâmicas o aspecto conhecido do quotidiano.

Na produção de cerâmica sanitária é frequente realizar cozeduras com um patamar de temperatura na ordem dos 1200°C, a sucessão de temperaturas e patamares é denominada de curva de cozedura ou curva de forno e é adaptada conforme o tipo de produto a cozer e o forno em utilização. Uma vez que a configuração geométrica das peças é complexa e varia conforme as diversas tipologias de artigos, a cozedura nesta indústria em específico é realizada em fornos túnel em que as peças são transportadas em vagonas em ciclos que podem oscilar entre as 14 e as 24h.

Este é o processo preponderante no que respeita a consumos de gás natural numa indústria deste tipo.

A curva de cozedura é dividida em regiões distintas, que são delimitadas fisicamente pelo comprimento do forno:

- **Pré aquecimento:** Aquecimento até uma temperatura a rondar os 700°C em cerca de 5h, este aquecimento é realizado com recirculação de ar quente proveniente da região de arrefecimento do forno. Dentro desta primeira fase ocorrem diversos processos. Até aos 150°C ocorre a perda de água não ligada quimicamente, esta evaporação é muito rápida, daí a importância de baixos teores de humidade. Nesta altura, humidades acima de 1-1,5% podem originar explosões devidas à evaporação *flash*. A partir dos 150°C o ritmo de aquecimento pode aumentar, nesta altura são incineradas impurezas orgânicas provenientes das matérias primas naturais, tais como resíduos vegetais presentes nas argilas. É importante que esta eliminação ocorra antes dos 500°C de modo a eliminar o aparecimento de um defeito denominado por “coração negro” que prejudica as características mecânicas do produto final. Entre os 500°C e os 700°C elimina-se a água quimicamente ligada, dá-se a designada desidroxilação. Ocorre também a decomposição de carbonatos que origina alguns gases, o que nesta fase não é problema uma vez que as paredes ainda são permeáveis. Nesta fase ultrapassa-se também uma fase crítica do processo de cozedura, por volta dos 573°C o quartzo da matriz cerâmica muda de fase da forma cristalina  $\alpha$  para a forma amorfa  $\beta$  o que origina uma expansão em volume de, aproximadamente, 2%. Esta expansão deve ser bem controlada pois pode originar defeitos no produto final.
- **Cozedura:** A partir dos 700°C começa a ocorrer a queima propriamente dita. Nesta fase são eliminados os compostos de carbono e enxofre. Dá-se a sinterização dos componentes cerâmicos e forma-se a constituição cerâmica atrás descrita como base, interface e esmalte. Nesta fase utilizam-se diferentes taxas de aquecimento de modo a controlar diversos processos que ocorrem.
- **Arrefecimento rápido:** Até perto dos 600°C o arrefecimento é realizado de uma forma rápida introduzindo ar frio pois o vidro ainda está numa forma plástica que permite esta operação sem ocorrência de defeitos.
- **Arrefecimento estático:** Após os 600°C a taxa de arrefecimento é diminuída de modo a homogeneizar as temperaturas para que na inversão do quartzo não haja uma contracção demasiado rápida dos materiais. Esta etapa é crítica no controlo do ciclo de cozedura.
- **Arrefecimento final:** Após os 490°C a taxa de arrefecimento é aumentada de modo a preparar as peças para a saída do forno sem choques térmicos de grandes dimensões.

À saída dos fornos as peças são descarregadas manualmente para paletes de transporte.

### 2.3.7. Escolha

Antes de poderem ser armazenadas e entregues no mercado, todas as peças passam por uma etapa de inspecção e embalagem.

### 2.3.8. Custos

Como se pode ver na Figura 4, a estrutura de custos deste processo produtivo está subdividida em quatro grandes grupos.

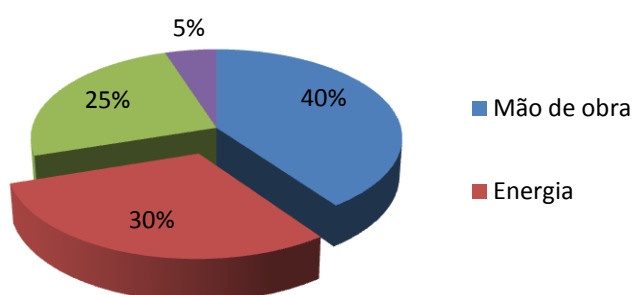


Figura 4: Estrutura de custos produção de cerâmica sanitária.

Além da utilização de mão de obra, o consumo intensivo de energia é característico desta indústria transformadora. Este consumo assenta na utilização de gás natural utilizado nos processos de secagem e cozedura e de energia eléctrica nas suas mais diversas utilizações, sendo a produção de ar comprimido uma das mais relevantes.

Tabela 1: Consumo específico da indústria cerâmica na Europa (GJ/t) (Comission, 2007).

Sector produtivo	1980	1985	1990	1995	2000	2003
Estrutural	2,65	2,45	2,19	2,06	2,38	2,31
Revestimentos	11,78	9,16	6,76	5,45	5,74	5,6
Refractários	4,88	4,96	6,51	4,91	5,41	5,57
Sanitários	26,56	24,214	22,27	22,76	20,88	21,87

Como se pode ver na tabela 1, a indústria cerâmica tem feito nos últimos 30 anos um caminho de evolução tecnológica e melhoria global na eficiência de processos. No entanto, os desafios do século XXI, como os indicadores ambientais e a concorrência da produção industrial de economias emergentes, continuam a pressionar as empresas no sentido da redução de custos.

### 3. SECAGEM

Neste capítulo efectuar-se-á uma análise global sobre o processo de secagem por meios térmicos, realçando a importância desta etapa num processo de produção de materiais cerâmicos.

#### 3.1. Introdução ao processo de secagem

O processo de secagem consiste na eliminação de substâncias voláteis (humidade) de um outro composto. A vasta maioria destes processos consiste na eliminação de água líquida de um corpo sólido por vaporização. A energia necessária à secagem pode ser transmitida ao corpo a secar por condução, convecção, radiação ou através do bombardeamento por micro ondas ou raios infravermelhos.

Actualmente, a larga maioria dos secadores em utilização na indústria cerâmica são convectivos, utilizando ar quente como meio de secagem, sendo que este processo apresenta um rendimento típico inferior a 60% devido a perdas por paredes e energia despendida no aquecimento de materiais e elementos de transporte.

Este processo de secagem é uma das operações unitárias mais comuns nas indústrias transformadoras como a química, alimentar, farmacêutica, têxtil, cerâmica, entre outras. Juntamente com a destilação, evaporação e cozedura um dos processos mais intensivos no que concerne ao consumo de energia, dado utilizar muita energia para ultrapassar o calor latente de grandes quantidades de água a remover e devido à ineficiência de se utilizar ar como meio de transporte de energia (sendo no entanto muito versátil como meio de transporte na introdução de calor e controlo e remoção de humidade).

Em específico, a secagem pode representar cerca de 5% em processos químicos até cerca de 35% na indústria do papel do total de energia térmica utilizada por uma instalação industrial. No caso específico da indústria cerâmica a secagem representa em média 20 a 40% da energia térmica do processo.

O processo de secagem é extremamente complexo pois envolve fenómenos transitórios de transferência de calor e massa conjuntamente com outros processos de ordem físico-química. No caso da secagem de produtos cerâmicos é preponderante a influência da secagem no comportamento físico de contracção dos produtos durante a sua secagem. Desta forma, o estudo e modelação de um processo de secagem são complexos, mesmo assumindo um modelo muito simplificado.

### 3.2. Conceitos teóricos

#### 3.2.1. Humidade nos sólidos

##### a) Teor de humidade nos sólidos

O teor de humidade contido num sólido pode ser expresso sob a forma de uma fracção da massa de água pela massa de sólido de duas formas distintas: em base seca, ou seja, massa de água por massa de sólido seco,

$$X = \frac{m_w}{m_{ds}} \quad (3.1)$$

ou em base húmida,

$$W = \frac{m_w}{m_{ds} + m_w} \quad (3.2)$$

a qual representa a massa de água sobre a massa total do conjunto antes da remoção de humidade.

Este teor de humidade pode ser representado da seguinte forma:

$$X = \frac{W}{1 - W} \quad (3.3)$$

##### b) Humidade de equilíbrio e isotérmicas de equilíbrio

Se um sólido higroscópico for exposto a ar com temperatura e humidade relativa constantes durante um período de tempo suficientemente prolongado, o seu teor de humidade tende para um valor de equilíbrio com as condições externas, denominado de humidade de equilíbrio ( $X_e$ ). Se a humidade do sólido for superior á humidade de equilíbrio correspondente ás condições do ar, este perderá humidade até atingir o valor de  $X_e$  correspondente.

A humidade de equilíbrio de um material depende da sua natureza e das condições de humidade e temperatura do ar a que está sujeito. A relação entre  $X_e$  e a humidade do ar, para uma temperatura constante, pode ser descrita através de curvas denominadas isotérmicas de absorção ou desorção, consoante o produto está a absorver ou perder humidade. No gráfico da figura 5 está representada uma curva típica. De notar que a humidade de equilíbrio para as mesmas condições de temperatura e humidade do ar revela um fenómeno de histerese caso haja absorção ou desorção de humidade por parte do sólido.

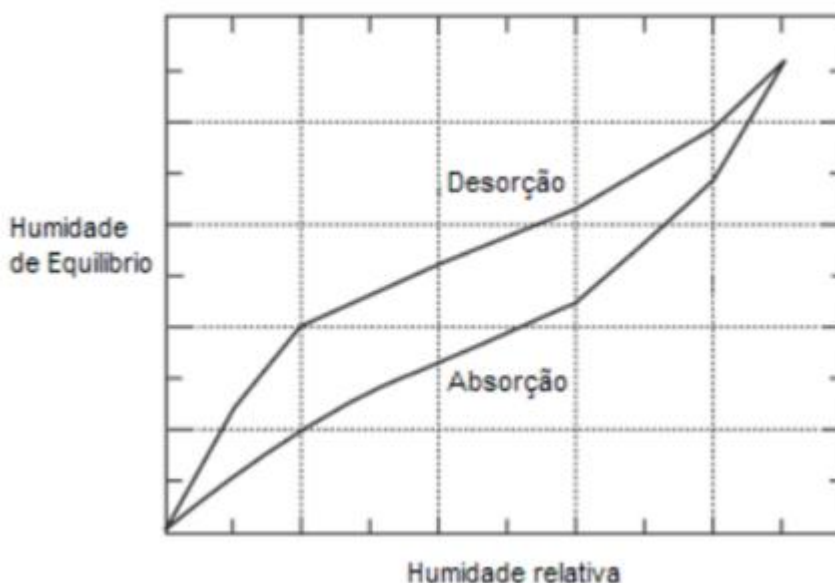


Figura 5. Curvas de absorção-desorção isotérmica típica. (MUJUMDAR, 2009)

### c) Tipos de humidade nos sólidos

- **Humidade não ligada:** É toda a humidade que um sólido higroscópico contém acima da humidade de equilíbrio correspondente à humidade de saturação do ar para uma determinada temperatura.
- **Humidade livre:** É toda a humidade que é possível remover de um sólido até se alcançar  $X_e$ , esta pode ser originada por humidade ligada e não ligada.

Para distinção de grupos de materiais consoante o tipo de humidades que retêm e também quanto ao tipo de comportamento apresentado na secagem, pode fazer-se a seguinte distinção:

- **Sólidos porosos não higroscópicos:** Inserem-se neste grupo materiais como a areia, alguns minerais, partículas poliméricas e alguns cerâmicos. Estes materiais caracterizam-se por apresentarem uma estrutura porosa facilmente detectável, sendo que esta estrutura se encontra completamente preenchida por água em saturação e, uma vez completamente secos, nenhum vestígio de água é retido. A quantidade de humidade ligada nestes sólidos é desprezável. Estes sólidos não sofrem contracção durante a secagem.

- **Sólidos porosos higroscópicos:** Neste grupo podem-se identificar materiais como argilas, têxteis ou madeiras que são caracterizados por espaços porosos, no entanto, ao contrário dos sólidos porosos não higroscópicos, exibem uma quantidade considerável de água ligada fisicamente. Estes sólidos contraem nas etapas iniciais de secagem.
- **Sólidos coloidais não porosos:** O sabão, alguns polímeros como o nylon, e um vasto número de produtos alimentares pertencem a este grupo. Nestes materiais toda a água líquida presente se encontra ligada fisicamente e, devido à inexistência de um sistema de poros, toda a evaporação ocorre à superfície.

Os materiais cerâmicos inserem-se nos dois primeiros grupos. A porcelana é composta por uma mistura de diferentes materiais dos dois primeiros grupos, assim, espera-se que apresente um comportamento de secagem combinado destes dois grupos. Devido à homogeneização de materiais, a porosidade não é tão evidente como em materiais granulares pelo que o comportamento se aproximará mais ao de sólidos porosos higroscópicos.

### 3.2.2. Processos de secagem

O processo de secagem térmica por convecção pode ser dividido em dois mecanismos de transferência de calor e massa entre o corpo a secar e o meio de secagem que ocorrem simultaneamente, como se ilustra na Figura 6.

- **Mecanismo externo:** Transferência de energia para evaporação/vaporização da humidade superficial e transporte dessa humidade.
- **Mecanismo interno:** Transferência de água do interior do corpo a secar para a sua superfície onde esta sofrerá o mecanismo externo.

A velocidade de secagem será controlada pelo mais lento dos dois mecanismos. É normal que num sólido que contenha um elevado teor de humidade, o processo limitante seja o primeiro. Por outro lado, num sólido com um baixo teor de humidade, a evaporação à superfície dar-se-á mais rapidamente que a migração do interior para a superfície. Neste caso o mecanismo limitante será o segundo.



Figura 6: Esquema simplificado dos fenômenos de transporte que ocorrem entre ar de secagem e o sólido a secar durante um processo de secagem convectiva.

### a) Mecanismos externos

Os processos que ocorrem no exterior do sólido a secar são influenciados essencialmente pela temperatura e humidade do ar, pela velocidade e direcção do escoamento e pela forma e disposição do sólido a secar. Estes são factores que influenciam os coeficientes externos de transferência de calor e massa por convecção (MUJUMDAR, 2009). Estas propriedades são particularmente importantes nas primeiras etapas do processo de secagem, ou seja quando se dá a evaporação da água presente na superfície do material a secar.

Para a análise destes processos é necessário um conhecimento aprofundado das propriedades do ar de forma a determinar as propriedades de transporte associadas ao escoamento, e um conhecimento das condições psicrométricas de forma a prever como se irá comportar a mistura ar/água com a adição de vapor de água proveniente do sólido.

### b) Mecanismos internos

Como resultado da transferência de calor para o sólido e com a vaporização da água superficial, desenvolvem-se gradientes de temperatura e humidade que promovem a migração de humidade do interior do material sólido para a superfície do mesmo. Essa migração pode ocorrer essencialmente pelo mecanismo de difusão de água no estado líquido ou gasoso e pelo mecanismo de escoamento capilar.

Para os processos de transferência de energia e massa que ocorrem no interior do sólido a secar, a importância das propriedades externas do escoamento e da humidade do ar de secagem tornam-se pouco relevantes. Torna-se preponderante a temperatura do ar de secagem, o tempo de permanência, a espessura e a porosidade do material a secar.

A espessura do material é importante na medida em que determina a distância que a água terá de percorrer entre o interior do material e a superfície do sólido a secar. A porosidade e a temperatura estão relacionadas com a facilidade com que a difusão e capilaridade ocorrerão.



Sendo que, maior temperatura e porosidade potenciarão o escoamento de humidade para o plano de secagem do sólido a secar.

### 3.2.3. Mecanismos de secagem

Entendem-se como mecanismos de secagem, as diferentes formas como a humidade se desloca dentro do sólido e como é posteriormente transportada pelo ar (SHERWOOD, 1933).

É importante distinguir os dois processos diferentes de transformação da água no estado líquido em vapor de água que ocorrem durante a secagem.

- **Evaporação:** Ocorre quando a pressão de vapor da humidade na superfície do sólido é igual à pressão atmosférica. Para uma pressão atmosférica normal isto é conseguido através de um aumento de temperatura. Se houver limitações no que respeita ao limite máximo de temperatura, esta evaporação pode ser conseguido por um abaixamento de pressão atmosférica como sucede em processos de secagem por vácuo.
- **Vaporização:** Acontece quando a pressão de vapor da humidade é inferior à pressão de saturação do ar de secagem. Este é o processo que ocorre na secagem por convecção a temperaturas inferiores à temperatura de ebulição da água à pressão atmosférica (MUJUMDAR, 2009).

O conhecimento das condicionantes relacionadas com o material a secar bem como das condições de operação é essencial para uma eficiente parametrização de um equipamento de secagem. Se, por exemplo, um processo de secagem for condicionado fortemente por mecanismos internos, será inútil intervir sobre parâmetros como a velocidade de escoamento do ar de secagem.

### 3.2.4. Etapas de secagem

O comportamento dos materiais durante um processo de secagem pode ser conhecido através da realização de trabalho experimental, através do registo de dados como a variação da massa ou da temperatura do sólido em função do tempo de secagem, para condições externas de secagem constantes. A partir destes estudos é possível estabelecer comportamentos característicos de um determinado material durante a secagem e verificar que variações ocorrem durante todo o processo.

De seguida ir-se-á analisar o comportamento típico de sólidos porosos higroscópicos à secagem nestas condições. Verificar-se-á que as curvas características da secagem destes materiais apresentam diversas etapas com características bem distintas como se vê na Figura 7.

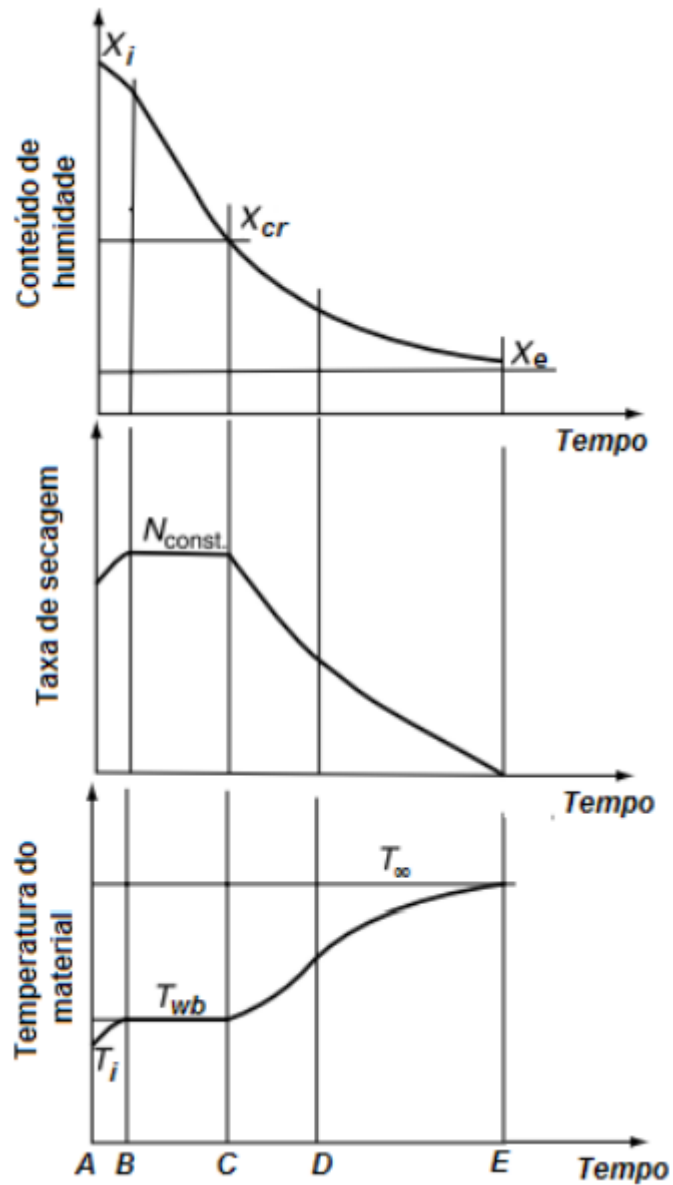


Figura 7: Variação de humidade, velocidade e temperatura de um sólido poroso higroscópico para condições de secagem constantes (MOLNÁR, 2009).

### **a) Primeira etapa – velocidade constante**

Se o sólido se apresentar completamente saturado em água, este terá de passar por uma etapa caracterizada por um período de velocidade de secagem constante. Nos gráficos da figura 6, este período está compreendido entre os pontos B e C.

Numa situação em que o material à temperatura inicial ( $T_i$ ) é exposto ao ar de secagem a uma temperatura superior ( $T_\infty$ ), este período é antecedido por um período de aquecimento designado por período de indução (A-B).

Nesta etapa, a secagem pode ser comparada à vaporização de água de uma superfície coberta por um filme de água, sendo que a vaporização se dá exclusivamente à superfície do sólido que se encontra, teoricamente, coberta de água. É comum considerar-se que a taxa de secagem equivalente é caracterizada pelo coeficiente de transferência de massa ( $h_m$ ).

No entanto, isto é apenas uma aproximação, uma vez que na realidade a superfície não está completamente coberta de água sendo que a vaporização neste período será ligeiramente inferior à de uma superfície coberta por água (KEEY, 1972).

Considera-se neste período que a temperatura superficial da peça é equivalente à temperatura de bolbo húmido ( $T_{wb}$ ) correspondente às condições do ar de secagem.

Importa referir que nos materiais argilosos, como o caso dos materiais de cerâmica sanitária, a contracção dá-se quase exclusivamente neste período de secagem (SHERWOOD, 1933). Assim sendo, as condições de secagem nesta etapa devem ser controladas cuidadosamente na medida em que se trata de um período crítico para a qualidade das peças a secar.

No período B-C a secagem é controlada somente pelas condições externas de secagem, pelo que as características do ar de secagem, como a velocidade e humidade relativa, são os factores de controlo da velocidade de secagem.

### **b) Períodos de queda**

Após o ponto C segue-se um período denominado período de queda que é caracterizado pelo decréscimo da velocidade de secagem com a diminuição do conteúdo de humidade do material. Nesta etapa, a superfície do sólido a secar deixa de se comportar como uma superfície coberta por um filme de água, uma vez que a velocidade de transporte de água do interior do sólido para a face superficial se torna inferior à velocidade de evaporação de água à superfície (ESCARDINO, 1991).

O ponto C de separação entre a velocidade constante e o período de queda é o ponto crítico de humidade, muitas vezes designado por humidade crítica ( $X_{cr}$ ). Este ponto depende das propriedades do material, das condições em que ocorre a secagem e também da humidade

inicial do produto a secar (SHERWOOD, 1933). Para os materiais em estudo, espera-se que este ponto se situe entre os 10% e os 12%.

A fase de velocidade decrescente pode ser subdividida em duas etapas. Na etapa C-D, algumas partes da superfície do sólido começam a ficar praticamente secas. Nesta fase a fracção de superfície húmida continua a secar de forma idêntica ao troço B-C mantendo a temperatura ( $T_{wb}$ ). No entanto, à medida que o sólido seca e o transporte de humidade até à superfície se torna inferior à taxa de evaporação superficial, verifica-se uma diminuição cada vez maior da superfície húmida sendo que a taxa de secagem por unidade de área diminui.

Nesta fase a secagem é influenciada pelos mecanismos internos e externos (MUJUMDAR, 2009) (ESCARDINO, 1991).

Esta fase faz particular sentido no caso em estudo, uma vez que dentro da câmara de secagem encontra-se uma complexidade de geometrias, devida à grande variedade de referências e modelos que coexistem num mesmo período de tempo no secador. Por exemplo, em sanitas de forma complexa, há regiões como o sifão que permanecem na fase B-C enquanto outros modelos, como lavatórios simples já se encontram praticamente secos. É importante dar o tempo de permanência necessário para que se atinja o equilíbrio térmico e para garantir a secagem de todas as peças.

Na etapa final, D-E a peça é seca até atingir a humidade de equilíbrio ( $X_e$ ). Neste período assume-se que a superfície do material está completamente seca e que a velocidade de secagem é controlada pelo transporte de água do interior da peça até à superfície. É também o período em que as peças atingem maior temperatura pelo que o mecanismo interno está favorecido, sendo que a condicionante poderá ser a estrutura interna do material.

Para peças cerâmicas, foi comprovado experimental que, para secagem de peças com conteúdo de humidade inferior a 6,5%, toda a operação de secagem ocorre nesta etapa (ESCARDINO, 1991).

### **c) Curva característica de secagem**

Normalizando as curvas de secagem para condições diversas de secagem através do uso da velocidade inicial característica do troço B-C ( $N_i$ ) e do teor médio de humidade, pode-se obter uma única curva característica de um determinado material, a qual poderá ser extrapolada para diferentes condições de secagem. As variáveis usadas nesta normalização são a velocidade característica de secagem ( $f$ ) e o conteúdo característico de humidade ( $\Phi$ ) que são dados pelas seguintes expressões.

$$f = \frac{N}{N_i} \quad (3.4)$$

$$\Phi = \frac{X - X_e}{X_{cr} - X_e} \quad (3.5)$$

em que  $N$  é a velocidade de secagem por unidade de área.

No entanto, a utilização destas curvas tem os seguintes pressupostos:

- $X_{cr}$  é invariável e independente do teor inicial de humidade ( $X_i$ );
- Todas as curvas de secagem para um determinado material são geometricamente similares para que a curva seja única e independente das condições de secagem.

Estes critérios são muito restritivos e dificilmente algum sólido os cumpre. No entanto este conceito tem a vantagem de permitir a extrapolação da curva para diferentes condições externas, apenas com o conhecimento da taxa de secagem durante o período de velocidade de secagem constante (MUJUMDAR, 2009).

### 3.2.5 Propriedades de transferência de massa características

De seguida apresentam-se algumas das propriedades de transferência de massa mais relevantes para processos de secagem.

#### a) Difusividade efectiva

Ao contrário do que acontece em gases e líquidos, em que a difusão é um processo bem conhecido teoricamente, a difusão em sólidos é um processo complexo que se pode dividir em vários tipos de transporte distintos, como por exemplo, difusão de vapor, difusão de líquido ou escoamento capilar (MARINOS-KOURIS & MAROULIS, 2009). Neste cenário, de forma a englobar os diferentes mecanismos de transporte interno num só, surge o parâmetro de difusividade efectiva ( $D_{eff}$ ).

A difusividade efectiva é um parâmetro que tem como objectivo representar a acção dos vários fenómenos responsáveis pelo transporte de humidade dentro de um corpo, assim como a influência das heterogeneidades de um corpo poroso. Esta variável pode ser definida recorrendo à aplicação da segunda lei de Fick para a difusão num sistema homogéneo (CRANK, 1975).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X \quad (3.6)$$

Esta equação descreve a variação da distribuição de humidade num corpo em função do tempo e é análoga à lei de Fourier que governa a condução de calor.

A equação 3.6 é vastamente utilizada para a construção de modelos de representação da cinética de secagem de materiais quando o processo é controlado por mecanismos internos.

A resolução da equação 3.6 pode ser obtida por métodos analíticos e numéricos, com o uso de um coeficiente de difusão constante ou variável. Várias soluções da segunda lei de Fick para diversas condições fronteira são apresentadas por Crank (CRANK, 1975). Estas soluções podem ser posteriormente usadas para a construção de modelos de secagem de materiais através da adaptação a dados experimentais da variação de massa de um sólido com o tempo de secagem, permitindo assim determinar  $D_{eff}$ .

A difusividade efectiva é maioritariamente afectada pela temperatura de secagem, pelo teor de humidade e pela porosidade do material (MARINOS-KOURIS & MAROULIS, 2009).

### **b) Coeficiente de transferência de massa**

Analogamente à lei do arrefecimento/aquecimento de Newton para a transferência de calor por convecção caracterizada por um coeficiente de convecção ( $h_c$ ), para a transferência de massa pode ser definido um coeficiente de transferência de massa,  $h_m$ , que permite determinar a taxa de secagem do material da seguinte forma:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{h_m A_s (Y - Y_s)}{m_{ds}} \quad (3.7)$$

em que  $A_s$  é a área de superfície do sólido,  $Y$  é a humidade do ar,  $Y_s$  é a humidade do ar na interface ar/sólido e  $m_{ds}$  a massa de sólido seco.

A equação 3.7 pode ser usada para a determinação da velocidade de secagem em situações em que o número de Biot ( $B_i$ ) para a transferência de massa é inferior a 0,1 (PAKOWSKI), ou seja, quando o processo é controlado pelos mecanismos externos como acontece no troço B-C da figura 6.

Existe uma vasta literatura que apresenta várias correlações empíricas que permitem determinar estes coeficientes para inúmeras situações (BEJAN & KRAUS, 2003), (INCROPERA, 2006).

### **c) Constante de secagem**

É comum usar-se no projecto de secadores uma constante denominada constante de secagem ( $K$ ) que representa uma combinação das propriedades  $h_m$  e  $D_{eff}$  atrás descritas. Esta constante pode ser definida através da utilização das equações de camada limite.

Estas equações foram primariamente apresentadas por Lewis, que sugeriu que para a secagem de materiais porosos e higroscópicos, no período de velocidade decrescente, a variação de humidade da peça em função do tempo é proporcional à diferença instantânea entre a humidade do material e a humidade final esperada quando este entra em equilíbrio com o ar de secagem, ou seja,  $X_e$  (MARINOS-KOURIS & MAROULIS, 2009). A equação proposta por Lewis é análoga à lei de Newton do arrefecimento e é descrita pela seguinte equação:

$$\frac{dX}{dt} = -K(X - X_e) \quad (3.8)$$

A constante  $K$  é usada como uma tentativa de determinação da velocidade de secagem de materiais quando o processo de controlo (interno ou externo) é desconhecido, como acontece por exemplo na primeira etapa do período decrescente descrita anteriormente. Desta forma, pode-se afirmar que esta constante depende de fenómenos de transferência de calor e massa externos e internos, podendo ser vista como uma representação da combinação de vários fenómenos de transporte. Pode-se assim afirmar que  $K$  depende de variáveis como o conteúdo de humidade, porosidade e espessura do material, assim como da temperatura, velocidade, humidade e direcção de escoamento de ar.

A constante  $K$  é bastante usada no projecto, optimização ou avaliação do funcionamento de secadores e processos de secagem que envolvem um grande número de processos iterativos (MARINOS-KOURIS & MAROULIS, 2009). Isto deve-se essencialmente à simplicidade dos modelos em que é usada, ao reduzido número de parâmetros envolvidos nesses modelos e porque as tradicionais equações diferenciais parciais que controlam os fenómenos de transporte internos e externos implicam um tempo de resolução numérica superior.

Esta constante pode ser determinada com recurso a trabalho experimental, adaptando o modelo em que é usada a dados de variação de massa de um sólido em função do tempo.

A determinação teórica desta constante não é possível uma vez que é puramente empírica. No entanto, caso seja provado que a secagem é comandada somente por mecanismos internos, pode-se relacionar  $K$  com  $D_{eff}$ . Para geometrias planas, por exemplo, a seguinte relação é válida:

$$K = \pi^2 \frac{D_{eff}}{\delta^2} \quad (3.9)$$

em que  $\delta$  representa a espessura da placa a secar (MARINOS-KOURIS & MAROULIS, 2009).

## 4. Caracterização do secador

### 4.1. Instalação

Na unidade industrial em estudo, existem dois tipos de secadores convectivos distintos. Existe uma instalação de funcionamento contínuo constituída por uma câmara de secagem através da qual circulam as peças transportadas por um transportador de cestas contínuo (Figura 8).



**Figura 8: Secador contínuo de peças cerâmicas.**

Existem ainda, diversas câmaras de secagem estacionárias, como a da Figura 9, para secagem de moldes de gesso e também de peças cerâmicas. Nestas câmaras as peças são transportadas em carros transportadores ou paletes.

O secador é abastecido por transpaletes que colocam os carros de peças no seu interior. Após a carga inicia-se o ciclo de secagem, sendo a descarga efectuada no dia seguinte.





**Figura 9: Secador descontínuo.**



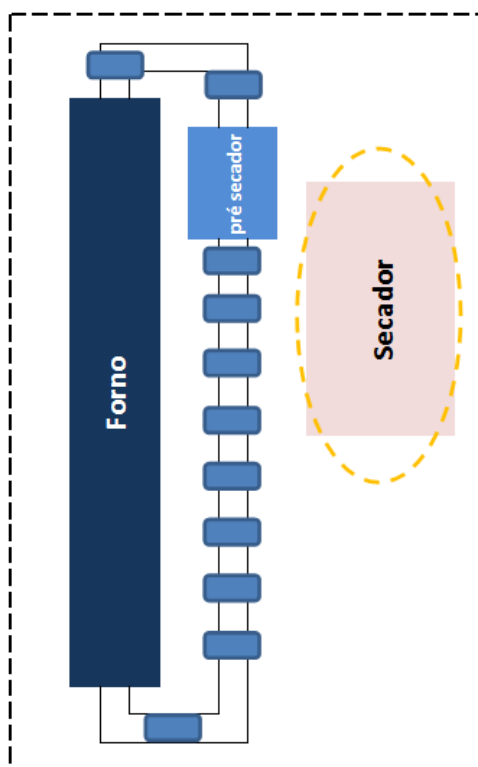
**Figura 10: Vista do interior do secador.**

A câmara de secagem é constituída por uma sala com 60m de comprimento por 10m de largura construída com uma parede dupla de alvenaria de cimento com um enchimento de lã mineral proveniente de desperdícios de revestimento das vagonas do forno. O tecto é constituído por uma estrutura metálica e uma cobertura de chapa metálica. De referir ainda que esta câmara tem um pé direito de 2,5m gerando um volume útil de trabalho de 1275m<sup>3</sup>. Este secador fica localizado paralelo ao forno sendo que a temperatura ambiente no seu exterior é praticamente constante durante todo o período anual de laboração e situa-se nos 33°C.



**Figura 11: Pormenor da parede dupla do secador.**

Como referido, o secador está situado ao lado de um dos fornos túnel da instalação, na disposição ilustrada na Figura 12.



**Figura 12:** Representação esquemática do layout da instalação em estudo.

A fonte de calor do secador centra-se num queimador de gás natural e o mesmo dispõe de um mecanismo que lhe permite, em função do setpoint, fazer a admissão de ar novo directamente do exterior da nave industrial ou de uma região localizada sobre o tecto do forno.

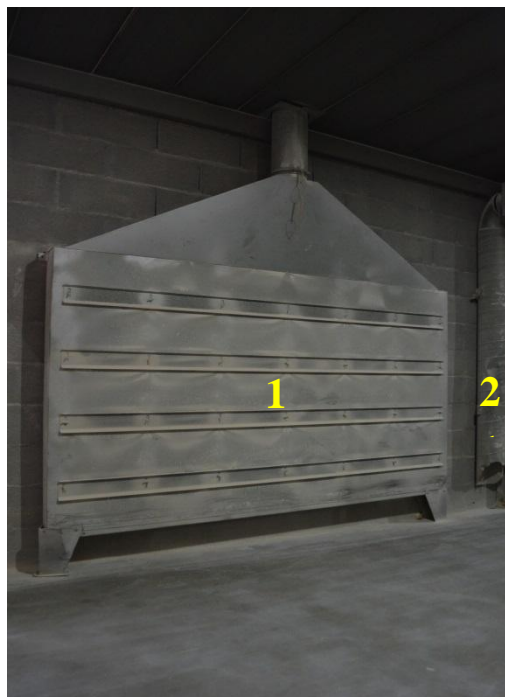


**Figura 13:** Vista da câmara de queima.



**Figura 14: Vista da cápsula de queima e do ventilador de impulsão.**

O aquecimento da câmara de secagem é realizado através da distribuição da mistura ar/produtos de combustão provenientes da central da Figura 14, através de uma conduta central que faz a divisão pelos diferentes cones difusores e através de um sistema paralelo de condutas que fazem a recirculação e mistura do ar de secagem no interior da câmara, Figura 15.



**Figura 15: Difusor lateral do sistema de recirculação(1) e tubo de injeção de ar quente recirculado da tómbola de mistura (2).**

O ar quente proveniente do sistema de queima, é introduzido na câmara no seu centro e distribuído por uma conduta principal para os cones difusores, como se pode ver na Figura 16.



**Figura 16:** Cone de difusão (1), alimentação de ar quente da conduta (2), entrada de ar proveniente do queimador (3).

A grande vantagem da secagem em câmara descontínua reside no facto de o mesmo poder ser utilizado com uma ampla gama de tipologias de peças, como se pode ver na Figura 17. Este ponto forte confere à operação de secagem um carácter de maior dificuldade pela heterogeneidade de peças e de graus de humidade inicial.

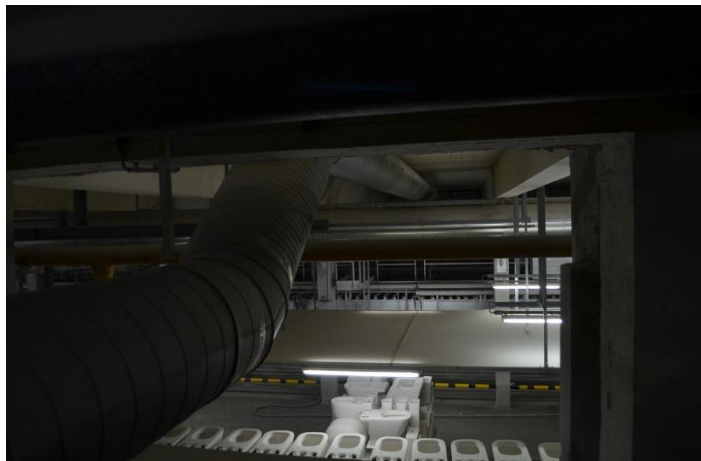


**Figura 17:** Vista interior do secador com carros de peças.





**Figura 18: Admissão de ar do exterior.**



**Figura 19: Admissão de ar por cima do forno.**

O sistema utiliza ar novo do exterior para arrefecimento da câmara de secagem e ar quente da região por cima do forno para os períodos de aquecimento e queima, Figuras 18 e 19.



**Figura 20: Tômbola misturadora.**

A tômbola misturadora (Figuras 20 e 21) é uma válvula de 3 vias que permite fazer a mistura de ar novo, a recirculação e a exaustão no sistema do queimador.

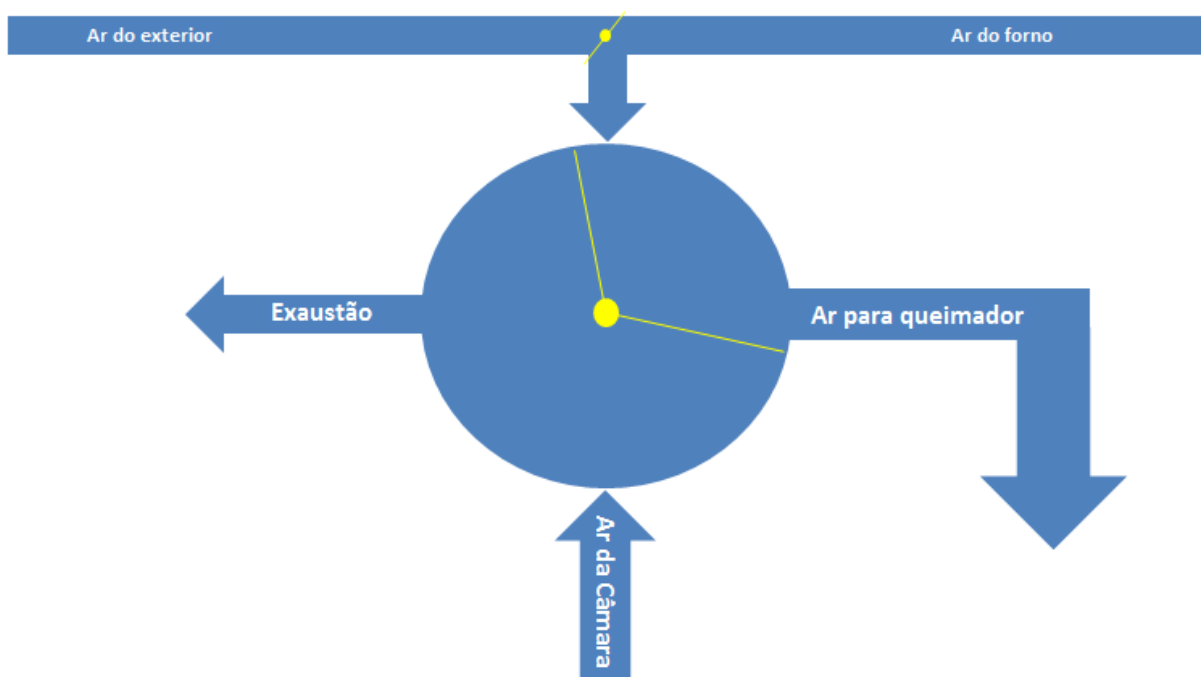


Figura 21: Representação esquemática do funcionamento da tómbola de mistura.

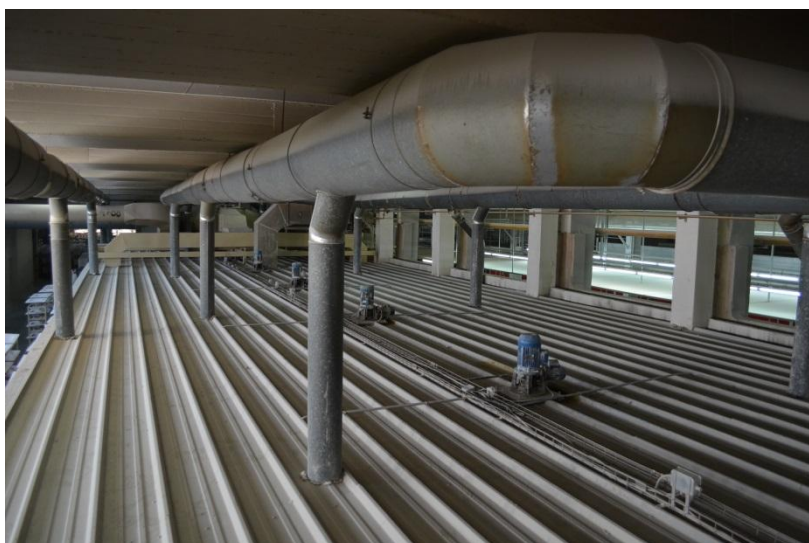
Em paralelo ao sistema de condutas associado ao queimador de gás e ao sistema de exaustão, existe também um sistema paralelo de recirculação e mistura de ar (Figuras 23 a 26). Este sistema faz a captação de gases junto ao tecto da câmara de secagem e injecta-os junto ao chão através dos difusores laterais.



Figura 22: Sistema de recirculação. Ventilador (1), conduta de insuflação (2) e conduta de extracção (3).



**Figura 23:** Tubos de extracção e vista dos motores de rotação dos cones difusores.



**Figura 24:** Tubos e condutas de extracção (lado direito) e insuflação (lado esquerdo).



**Figura 25:** Vista do interior da câmara de secagem. Difusor lateral e tubo de admissão de ar de tecto.

Em resumo. Nas imagens anteriores demonstra-se a existência de dois sistemas de ventilação e aquecimento distintos de serviço à câmara de secagem. Estes sistemas constituem o secador propriamente dito e o objectivo é ter uma boa mistura e homogeneização de correntes gasosas de secagem no interior da câmara de secagem.

Esta mistura é pretendida, pois um dos desafios destas câmaras de secagem comparativamente a equipamentos utilizados em cerâmica decorativa ou plana é o facto de haver uma heterogeneidade muito grande de geometrias de peças a secar.

Devido ao mix produtivo da unidade industrial, é necessário realizar a secagem em simultâneo de peças com diferentes tamanhos, diferentes formas geométricas e diferentes graus de humidade. Esta limitação produtiva, origina a utilização de um programa de secagem com uma grande margem de segurança que garanta que todas as peças, independentemente da sua forma e tamanho contenham um teor de humidade inferior a 1% no final do ciclo de secagem.

Frequentemente, peças de geometria mais complexa, como é o exemplo das sanitas, são dispostas na zona central do secador junto aos cones difusores e peças de geometria simples como tanques e lavatórios são dispostos junto às paredes exteriores do secador.



## 4.2. Curva de secagem

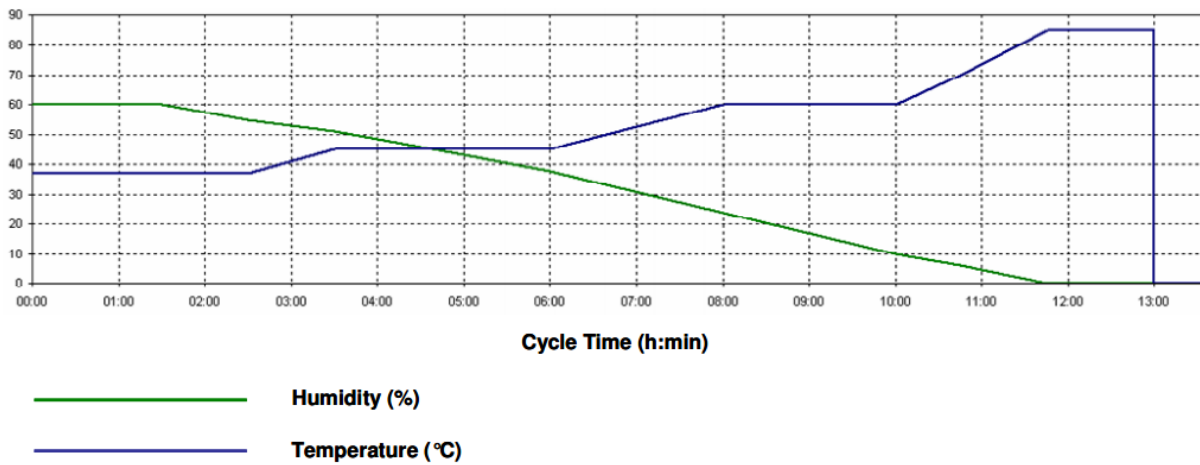


Figura 26: Curva de secagem utilizada no secador.

Os parâmetros de controlo utilizados neste secador são, a temperatura e a humidade relativa do ar no interior da câmara lida através de transdutores de temperatura e humidade localizados no interior da mesma. O sistema é controlado por um autómato e um sistema de supervisão construído em LabView® (Figura 28) tendo como setpoints as curvas da Figura 27, sendo a linha azul para o controlo de temperatura e a linha verde para controlo de humidade relativa do ar.

Na primeira fase deste ciclo, pretende-se que a massa existente no secador atinja um equilíbrio térmico, é realizado o aquecimento das peças e uma parte da energia é gasta a aquecer os carros de transporte, as condutas e os equipamentos internos da câmara de secagem. Neste período pretende-se uma velocidade de secagem lenta, pelo que é solicitada uma humidade relativa de 50% no interior do secador.

Após um período de 2 horas aumenta-se gradualmente a temperatura e diminui-se a humidade relativa do ar, é notório na curva o objectivo de realizar a secagem por mecanismos externos na primeira fase do ciclo, durante as primeiras 8h, havendo um período em que se atinge o pico de temperatura de 80°C-85°C na fase final para promover os mecanismos internos de migração de água no interior dos corpos cerâmicos.

No total, usa-se um ciclo de 13h, havendo depois o arrefecimento da câmara de modo a que os operadores possam entrar na mesma para iniciar a descarga.

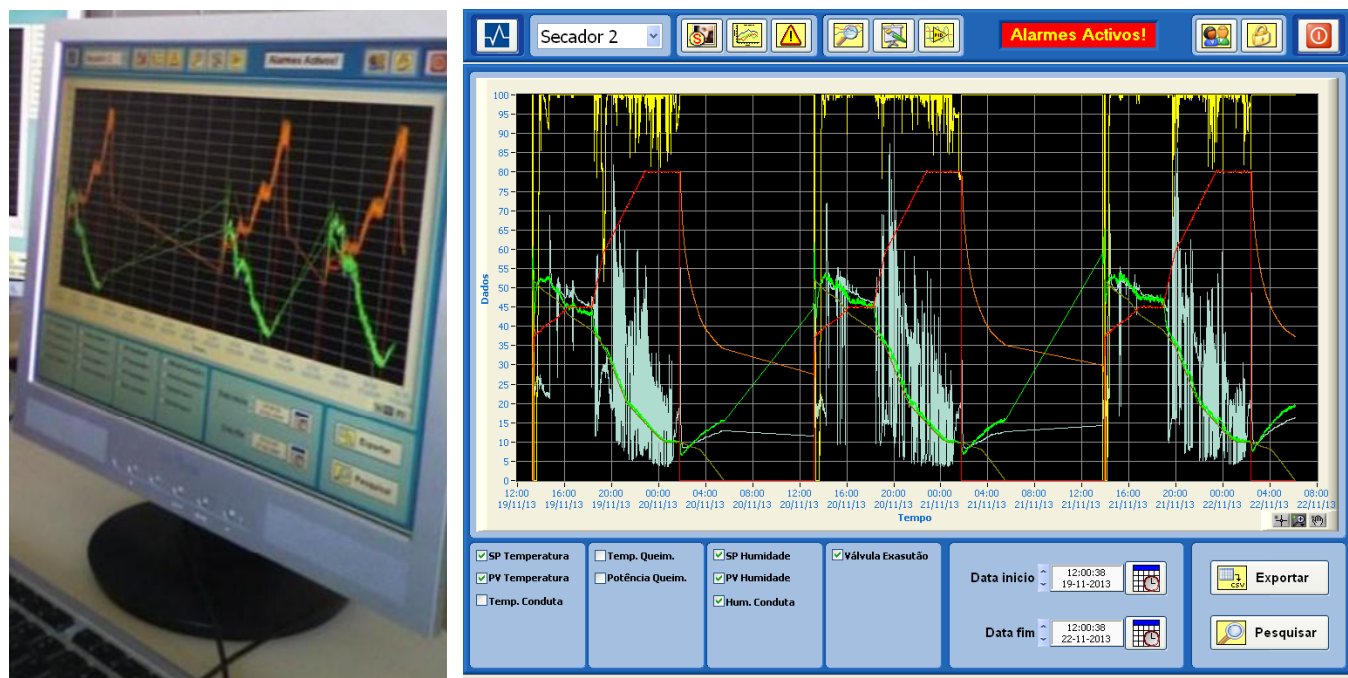


Figura 27: Sistema de supervisão e controlo do secador.

O objectivo é que no final do ciclo de secagem, todas as peças apresentem uma humidade inferior a 1% (em peso e base húmida). Para tal, o laboratório central, determina a humidade após todos os ciclos realizados, sendo que está definido pelo procedimento de qualidade uma humidade máxima de 0,9%. Tipicamente, com uma entrada de 10%-14% em média das peças verdes, obtém-se um produto com humidades abaixo de 0,5%.

## 5. Componente experimental

### 5.1. Equipamento utilizado



Figura 28: Sistema de pesagem instalado no secador.

De modo a se poder fazer o acompanhamento do comportamento do peso das peças no interior do secador, foi instalado um sistema de pesagem (Figura 29) constituído por um suporte metálico assente em sinoblocos do lado interior da câmara de secagem e assente numa célula de carga localizada no exterior da câmara, Figura 29. Além do acompanhamento do peso, fez-se também o registo colocando um sensor de temperatura e humidade relativa junto à parte inferior do carro de peças e outro junto à parte superior. Esta instalação foi feita com auxílio da equipa de manutenção eléctrica e automação utilizando equipamentos já existentes na empresa.

Este equipamento foi instalado no canto da câmara de secagem, no ponto mais afastado dos cones de difusão, de modo a garantir que, obtendo secagem neste ponto, todas as outras peças do secador estariam também elas secas.

## 5.2. Ensaios realizados e resultados

Fez-se o acompanhamento de alguns dias de secagem através do sistema de pesagem instalado no secador tendo-se obtido os seguintes valores processuais.

De notar que a louça produzida na segunda é colocada em carros de transporte e seca na terça, a louça de terça é colocada em carros na quarta e seca nesse dia, a louça de quinta é colocada em carros na sexta sendo que a secagem da mesma é só efectuada no domingo (aproveitando-se para fazer todo o ciclo de secagem em horário de vazio) e a louça de sexta é colocada em carros na segunda sendo seca nesse dia.

Desta forma as peças produzidas à quinta e sexta têm um tempo de pré secagem dilatado comparativamente às dos outros dias da semana.

Uma vez que foram acompanhados carros com diferentes tipos de peças em dias distintos, o acompanhamento do peso é feito em termos relativos de variação de peso em relação ao peso inicial.

De salientar ainda, que entram no secador peças com diferentes teores de humidade, em função de defeitos que possam surgir no processo, as peças poderão ser sujeitas a um maior tempo de estadia em olaria, antes de avançarem para o processo de secagem e subsequentes.

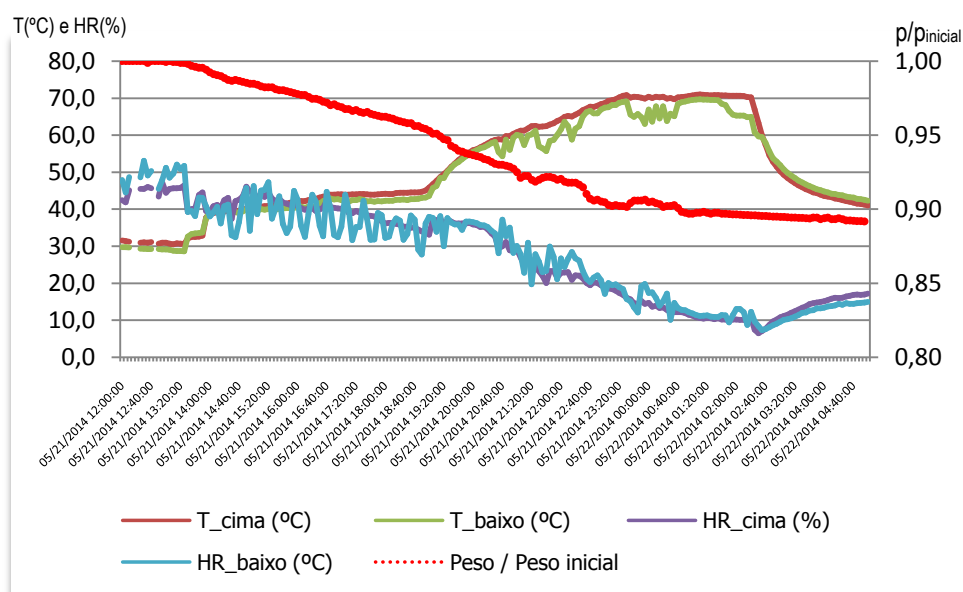


Gráfico 1: Ciclo de secagem quarta para quinta feira 1ª semana.

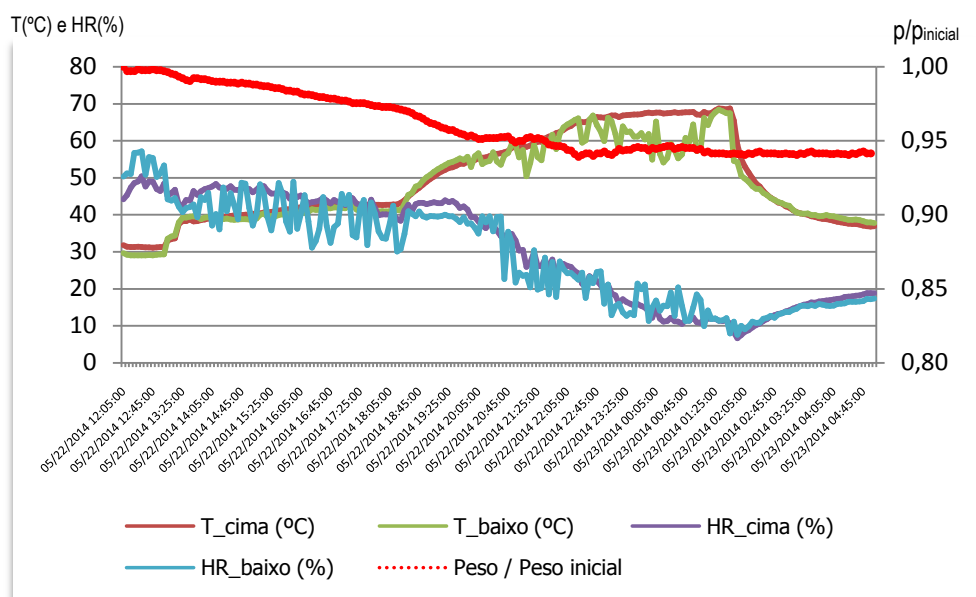


Gráfico 2: Ciclo de secagem de quinta para sexta feira 1ª semana.

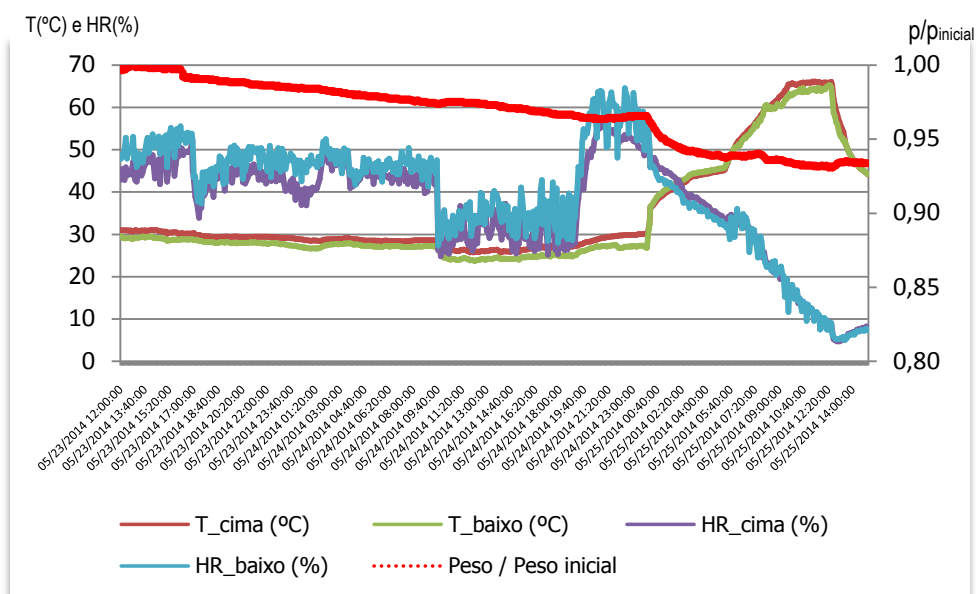


Gráfico 3: Ciclo de secagem de sexta feira a domingo 1ª semana.

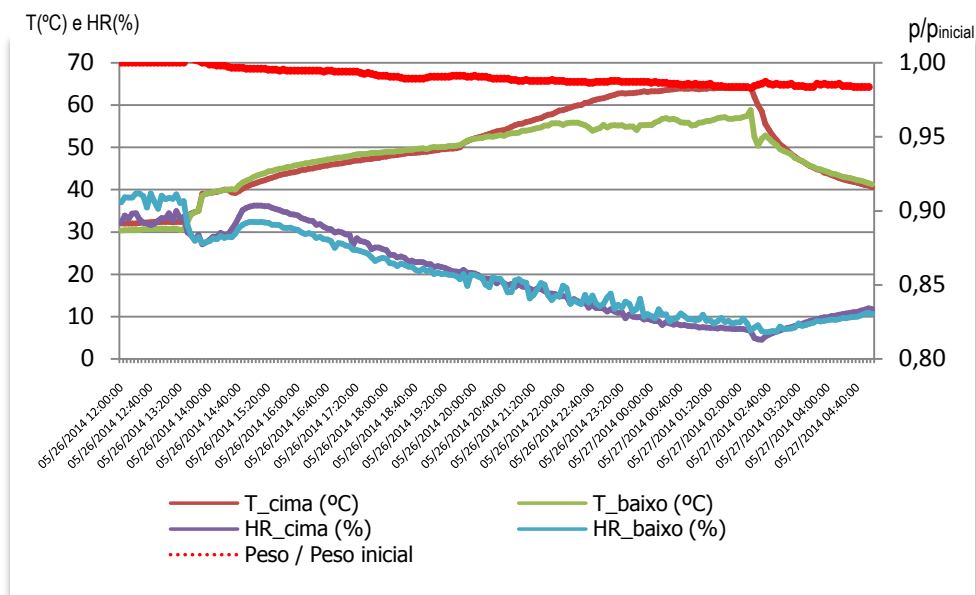


Gráfico 4: Ciclo de secagem segunda para terça feira 1ª semana.

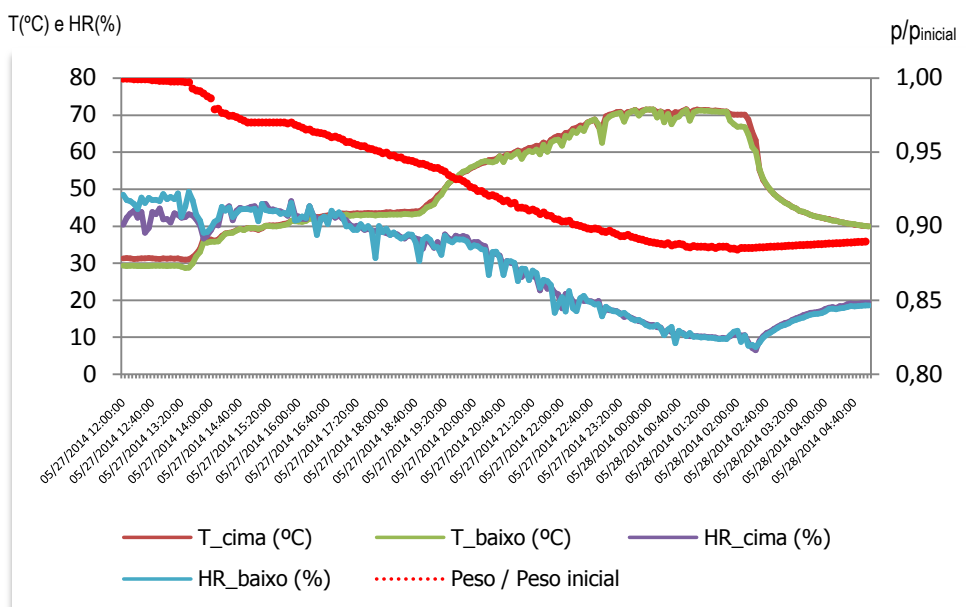


Gráfico 5: Ciclo de secagem deterça para quarta feira 1ª semana.

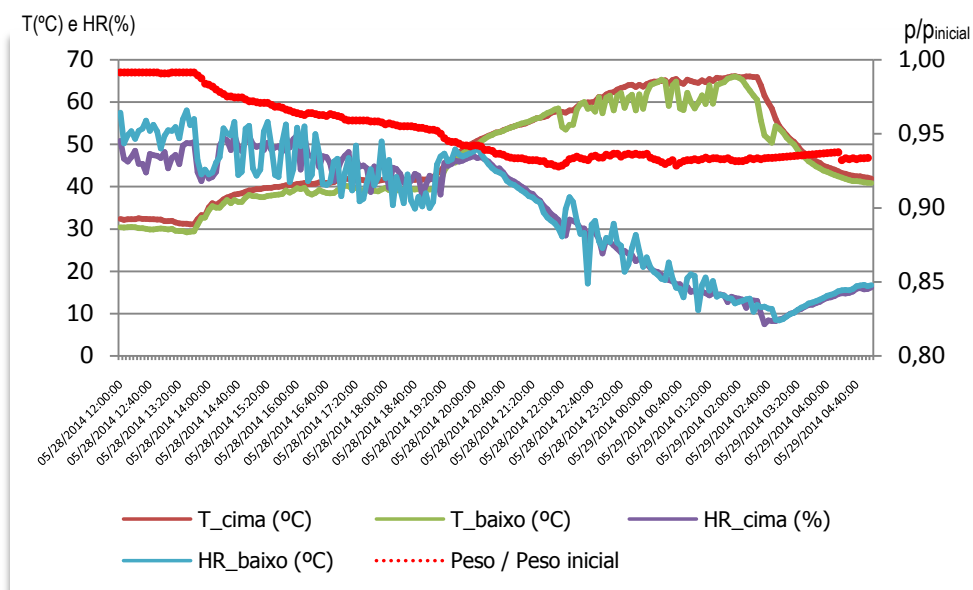


Gráfico 6: Ciclo de secagem de quarta para quinta feira 2ª semana.

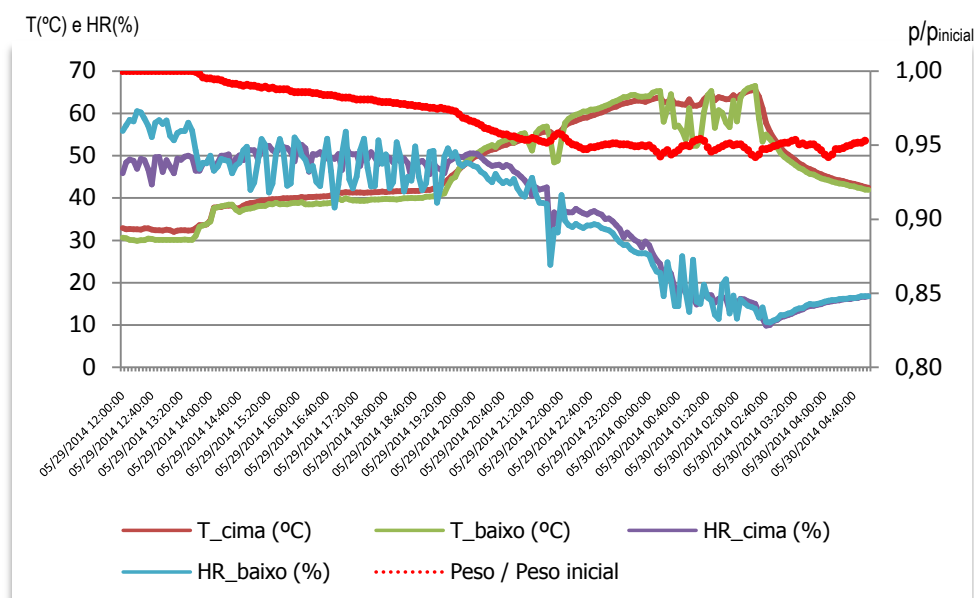


Gráfico 7: Ciclo de secagem de quinta para sexta feira 2ª semana.



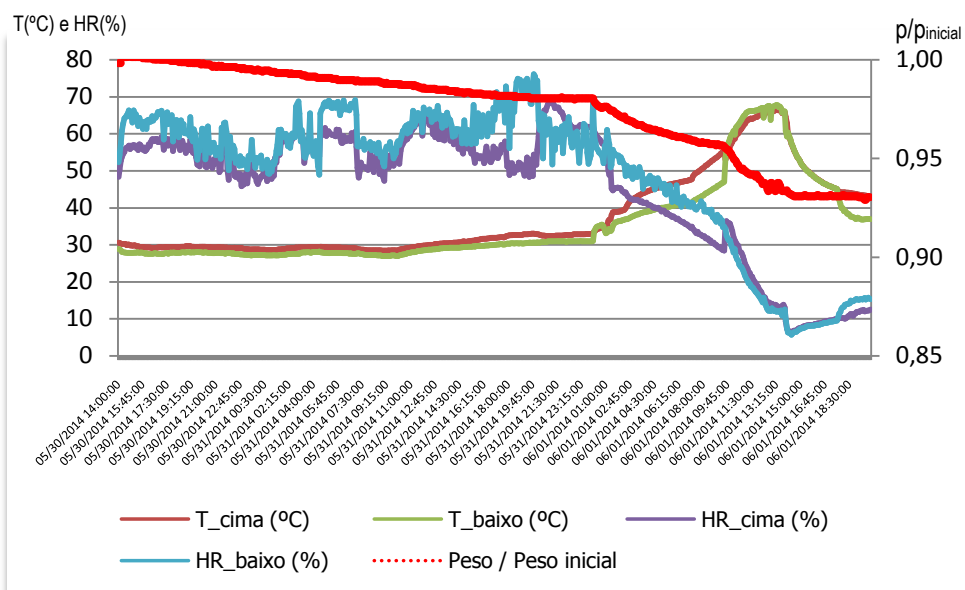


Gráfico 8: Ciclo de secagem de sexta-feira a domingo 2ª semana.

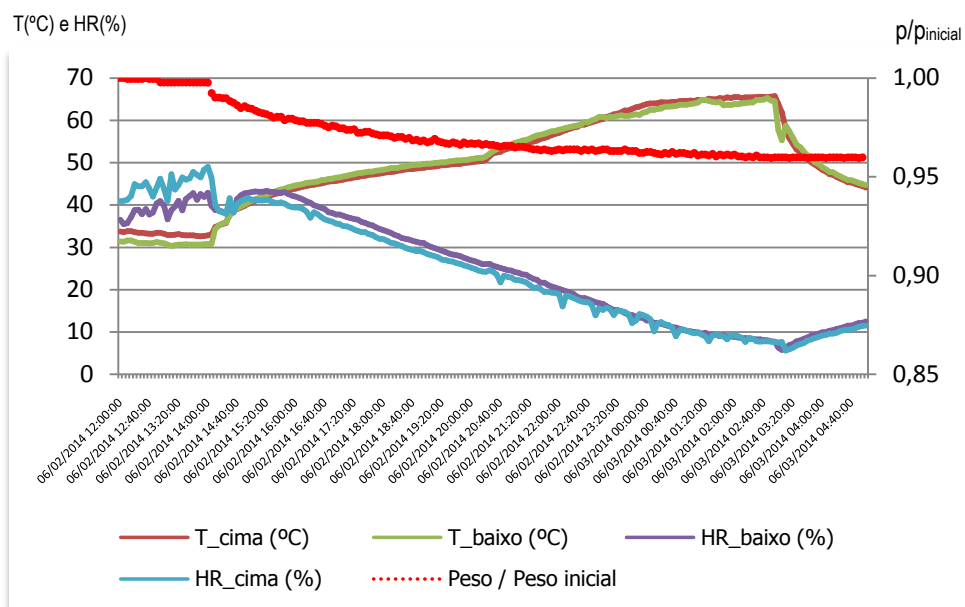
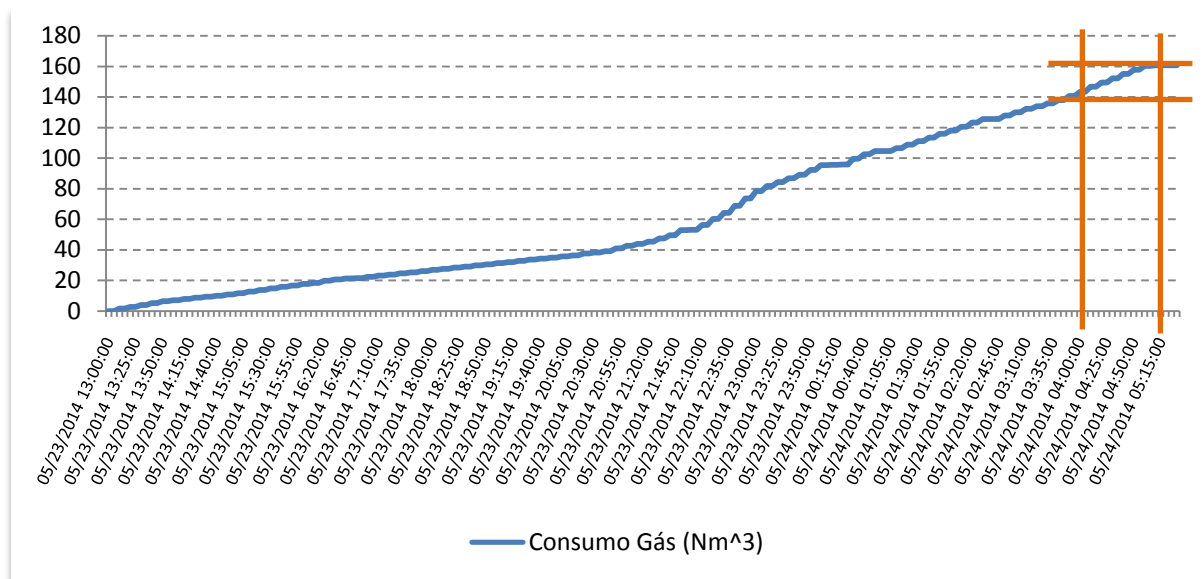


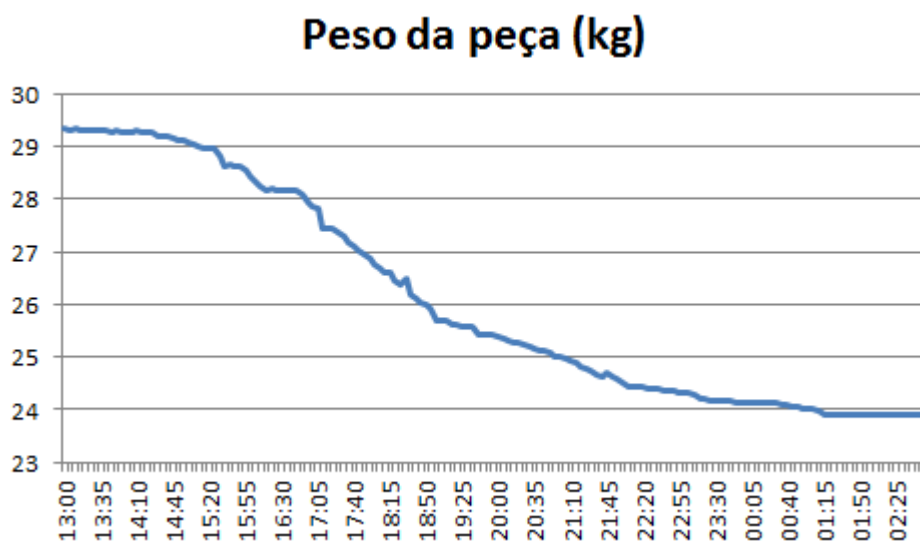
Gráfico 9: Ciclo de secagem de segunda para terça-feira 2ª semana.





**Gráfico 10: Consumo de gás de um ciclo de secagem.**

Além do acompanhamento atrás apresentado, foi feito o registo do peso de uma sanita durante um ciclo de secagem num equipamento distinto. Esta sanita tinha uma humidade inicial de 18,9% medida a partir de um provete cortado da peça e seco em estufa no laboratório. Obteve-se a seguinte curva de massa para a curva de secagem atrás apresentada.



**Gráfico 11: Evolução do peso de uma peça durante o ciclo de secagem.**

A evolução do peso da peça, ilustra a perda de massa da mesma na sequência da perda de humidade. Esta evolução vai de encontro ao esperado e a curva demonstra ter um comportamento análogo às curvas vistas em 3.2.4..

### 5.3. Consumos de energia térmica do secador

Durante o mês de março de 2013, foi realizado o registo de todas as cargas efectuadas e registados os consumos de gás natural do secador. As massas foram calculadas tendo em conta os pesos médios por tipologia de produto (lavatórios, tanques, sanitas, etc.). Estes produtos variam de massa a cada ciclo de produção, uma vez que o controlo de espessura é efectuado na conformação, tendo em conta o tempo de vida dos moldes e os objectivos de defeituosidade das peças. Como tal, é necessário assumir valores médios, com os quais, todos os cálculos de produção são realizados.

Dos ciclos de secagem de um mês obteve-se a informação que se resume na seguinte tabela.

**Tabela 2: Cargas e consumos de gás durante o mês de março 2013.**

	Número de peças	Massa material húmido (kg)	Consumo de gás (m <sup>3</sup> )
01-03-2013	1833	24700	156,2
04-03-2013	1742	23500	160,7
05-03-2013	1749	23600	179,5
06-03-2013	2093	27500	189,2
07-03-2013	1861	25000	179,9
08-03-2013	1946	26200	139,1
11-03-2013	1812	25000	116,7
12-03-2013	1600	21700	140,1
13-03-2013	1707	22800	159,1
14-03-2013	1953	26100	163,6
15-03-2013	1861	25100	126,1
18-03-2013	1736	23300	113,1
19-03-2013	1779	23500	156,9
20-03-2013	2034	26600	174,7
21-03-2013	2126	28000	177,6
22-03-2013	2227	29400	142,4
25-03-2013	2154	28700	111,3
26-03-2013	1829	24400	154,4
27-03-2013	1844	24700	160,5
28-03-2013	1836	24500	163,2

A tabela, é demonstrativa das oscilações produtivas, que ocorrem durante um mês de produção.

Considerando a temperatura de fornecimento do gás natural de 15°C, a pressão de 3bar e um PCS de 17,6MJ/Nm<sup>3</sup>, podem determinar-se os factores de correcção volumétrica utilizados em (Galp Energia), para obter a energia associada ao volume de gás.

Sendo:

- Fct o factor de correcção de temperatura dado por  $273,15/(273,15 + T_{\text{gás}}) = 0,9479$
- Fcp o factor de correcção por pressão dado por  $(Pr + 1013,25)/1013,25 = 3,96077$
- PCS = 17,6MJ/Nm<sup>3</sup> = 4,8889 kWh/ Nm<sup>3</sup>.

Obtém-se a seguinte tabela em que se pode calcular o consumo específico por massa de material húmido. Fez-se a correcção para kWh uma vez que é a grandeza facturada pelo fornecedor de gás natural.

**Tabela 3: Cargas e consumos de gás durante o mês de março 2013, com consumo específico.**

	Número de peças	Massa material húmido (kg)	Consumo de gás (m <sup>3</sup> )	Energia (kWh)	Consumo específico (kWh/kg de material húmido)
01-03-2013	1833	24700	156,2	2874,1	0,1164
04-03-2013	1742	23500	160,7	2956,9	0,1258
05-03-2013	1749	23600	179,5	3302,8	0,1399
06-03-2013	2093	27500	189,2	3481,3	0,1266
07-03-2013	1861	25000	179,9	3310,2	0,1324
08-03-2013	1946	26200	139,1	2559,4	0,0977
11-03-2013	1812	25000	116,7	2147,3	0,0859
12-03-2013	1600	21700	140,1	2577,8	0,1188
13-03-2013	1707	22800	159,1	2927,4	0,1284
14-03-2013	1953	26100	163,6	3010,2	0,1153
15-03-2013	1861	25100	126,1	2320,2	0,0924
18-03-2013	1736	23300	113,1	2081,0	0,0893
19-03-2013	1779	23500	156,9	2887,0	0,1228
20-03-2013	2034	26600	174,7	3214,5	0,1208
21-03-2013	2126	28000	177,6	3267,8	0,1167
22-03-2013	2227	29400	142,4	2620,2	0,0891
25-03-2013	2154	28700	111,3	2047,9	0,0714
26-03-2013	1829	24400	154,4	2841,0	0,1164
27-03-2013	1844	24700	160,5	2953,2	0,1196
28-03-2013	1836	24500	163,2	3002,9	0,1226

Da tabela atrás verifica-se que as oscilações de ritmos produtivos, originam ineficiências no que toca ao consumo específico do equipamento de secagem. O facto de a utilização do secador ser feita sempre utilizando a mesma curva, é determinante para esta ocorrência.

Verificou-se que a secagem ocorre como esperado e como descrito pela literatura, pelo que o trabalho a realizar deverá ser de criação de curvas que se possam adaptar à carga de material húmido efectuada no secador.

#### **5.4. Proposta de intervenção**

Da leitura dos gráficos 1 a 10 resultantes do acompanhamento das diversas secagens verifica-se que nas operações de domingo a terça se atinge um peso aproximadamente constante algum tempo antes de terminar o ciclo de secagem. Nas secagens de quarta e quinta verifica-se uma maior instabilidade tanto no peso das peças, como na humidade relativa do ar.

Em todos os casos, verificou-se no final uma humidade dentro do parâmetro de controlo de  $W \leq 1\%$  (em peso).

No seguimento, será implementada uma proposta de alteração da utilização das curvas de secagem em que se programará uma curva para utilização aos domingos, segundas e terças com menos uma hora no patamar de 80°C.

Espera-se com esta alteração reduzir a queima de gás natural em 20 m<sup>3</sup> por ciclo o que reduzirá o consumo desta fonte de energia por parte do secador em **7,5%**, extrapolando informação a partir do gráfico 10.

Além do mais, será proposta a melhoria ao nível de robustez e fiabilidade, do equipamento de pesagem, para que se possa fazer a integração do mesmo com o sistema de controlo e supervisão do secador. Desta forma a resposta do mesmo poderá ser também função da evolução do peso medido por este equipamento.

## 6. CONCLUSÕES

Apresentam-se agora conclusões gerais da realização deste trabalho, sendo também sugeridas propostas para trabalhos futuros.

### 6.1. Conclusões gerais

No desenvolvimento deste trabalho verificou-se que a operação de secagem, embora de aparência e filosofia simples, encerra em si um carácter de importância e complexidade fulcral ao bom funcionamento de um processo de fabrico de peças de cerâmica sanitária, em particular, e da indústria cerâmica em geral.

Verifica-se que no caso particular da secagem de peças de materiais cerâmicos ocorrem mecanismos de secagem externos e internos, o que permite que haja um conhecimento da parametrização necessária das câmaras de secagem a utilizar.

De facto, o processo tem de ser fiável e estável de modo a que a secagem de todas as peças seja garantida. Por esta razão, é utilizada uma curva com um factor de segurança grande, as peças atingem uma massa praticamente constante algum tempo antes de terminar o ciclo de secagem o que indicia que poderá haver algum consumo de energia térmica desnecessário.

A carga de peças realizada à segunda, à terça e à sexta-feira necessitará, à partida, de um ciclo de secagem mais curto ou a temperatura mais baixa. As peças carregadas à segunda-feira passam o fim-de-semana nas salas de conformação pelo que a humidade inicial das mesmas no processo de secagem será inferior às da restante semana. As peças carregadas à sexta-feira iniciam o processo de secagem apenas no domingo às 00:00h de modo a maximizar o consumo de energia eléctrica em períodos bonificados de consumo de energia eléctrica. Por este factor também iniciam o processo de secagem com um teor de humidade inferior. Esta alteração de programa de secagem conduzirá a uma poupança de gás natural na ordem dos 7,5% que se traduz em cerca de 4000€ por ano, a esta poupança deve-se também adicionar a que se realizará em consumo de energia eléctrica em função da redução do tempo de ciclo, sendo que a mesma não está calculada no âmbito deste projecto.

## 6.2. Trabalho futuro

Da execução deste trabalho, surgem algumas ideias que poderão configurar oportunidades de melhoria futuras, no sentido da optimização da utilização das instalações de secagem da unidade industrial e de outras unidades do grupo espalhadas pelo mundo.

- Testar experimentalmente a utilização de diversas configurações de ciclo, com diferentes durações e diferentes patamares de temperatura;
- Estudar a humidade que as peças adquirem após a descarga do secador e vidragem e verificar se é necessário efectuar secagens até 1% de teor final;
- Modelar a cinética de secagem do fenómeno que ocorre dentro da câmara de secagem e, se possível, testar numericamente através de simulação computacional;
- Relacionar o controlo automático do secador com a célula de carga utilizada para monitorização da perda de humidade durante a secagem;
- Normalizar o *layout* dos carros de peças dentro da câmara de secagem, para que seja o mais homogéneo possível face às oscilações produtivas;
- Determinação de curvas isotérmicas de equilíbrio do material, estudando assim a influência de outros parâmetros além da temperatura na humidade de equilíbrio das peças para diferentes condições.
- Determinação da humidade inicial ideal no início do processo de secagem, determinando assim o tempo que deve decorrer entre a conformação e a operação de secagem em câmara.



## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AVEN. (2007). *Guía de ahorro y eficiencia energética en el sector de la cerámica artística, de uso y técnica de la comunidad Valenciana*. Valencia: Agencia Valenciana de la Energía.
- BEJAN, A., & KRAUS, A. D. (2003). *Heat transfer handbook*. John Wiley & Sons.
- Comission, E. (2007). *Reference document on best available techniques in the ceramic manufacturing industry*. European comission.
- CRANK, J. (1975). *The mathematics of diffusion: Oxford science publications*. Oxford, England: Clarendon press.
- ESCARDINO, A. [. (1991). *Secado de materiales cerámicos (II). Cinética del secado de piezas cerámicas. Técnica cerámica*.
- Galp Energia. (n.d.). <http://www.galpennergia.com/PT/ProdutosServicos>. Retrieved from <http://www.galpennergia.com/PT/ProdutosServicos/GasNatural/Mercado-Regulado/Facturacao/Paginas/FacturaGasNatural.aspx>
- GUASTALA, F. (2009). *Understanding the manufacturing process of sanitaryware*. São Paulo: Roca.
- INCROPERA, F. P. (2006). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- KEEY, R. B. (1972). *Drying principles and practice: International series of monographs in chemical engineering*. v. 13. New York: Pergamon press.
- MARINOS-KOURIS, D., & MAROULIS, Z. (2009). *Transport properties in the drying of solids IN: Handbook of industrial drying, third edition*. CRC Press.
- MOLNÁR, K. (2009). *Experimental techniques in drying IN: Handbook of industrial drying, third edition*. CRC Press.
- MUJUMDAR, A. S. (2009). *Principles, classification, and selection of dryers. In: Handbook of industrial drying, third edition*. CRC Press.
- PAKOWSKI, Z. A. (n.d.). *Basic process calculations and simulations in drying IN: Handbook of industrial drying, third edition*. 2009: CRC Press.
- SERRANO, A. (2009). *Manual de boas práticas na utilização racional de energias e energias renováveis*. Coimbra: APICER.
- SHERWOOD, T. K. (1933). *The drying of solids. V. Mechanism of drying of clays IN: Industrial & Engineering Chemistry*.
- UNIDO. (1994). *Output of a seminar on energy conservation in ceramic industry*. Bangladesh: UNIDO.